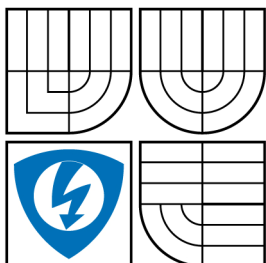


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY



FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

SENZORY PLYNŮ, JEJICH KONSTRUKCE A TESTOVÁNÍ

GAS SENSORS, THEIR CONSTRUCTION AND TESTING

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. ZDENĚK PYTLÍČEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. JAN PRÁŠEK, Ph.D.

BRNO 2010



**VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií**

Ústav mikroelektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Mikroelektronika

Student: Bc. Zdeněk Pytlíček

ID: 88959

Ročník: 2

Akademický rok: 2009/2010

NÁZEV TÉMATU:

Senzory plynů, jejich konstrukce a testování

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s problematikou detekce plynů. Blíže prostudujte senzory plynů, jejich princip, konstrukci a metodiku pro testování. Na základě získaných znalostí navrhnete a zrealizujete zařízení pro testování senzorů plynů.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 8.2.2010

Termín odevzdání: 27.5.2010

Vedoucí práce: Ing. Jan Prášek, Ph.D.

prof. Ing. Vladislav Musil, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Licenční smlouva poskytovaná k výkonu práva užít školní dílo

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Bc. Zdeněk Pytlíček
Bytem: Modřická 76, Brno, 619 00
Narozen/a (datum a místo): 17. 8. 1983, Brno

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
se sídlem Údolní 244/53, 602 00 Brno
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:
Prof. Ing. Vladislav Musil, CSc.
(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1 Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):
- ☐ disertační práce
 - ☒ diplomová práce
 - ☐ bakalářská práce
 - ☐ jiná práce, jejíž druh je specifikován jako
- (dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Senzory plynů, jejich konstrukce a testování
Vedoucí/ školitel VŠKP: Ing. Jan Prášek, Ph.D.
Ústav: Ústav mikroelektroniky
Datum obhajoby VŠKP:

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v:

- ☒ tištěné formě – počet exemplářů 2
- ☒ elektronické formě – počet exemplářů 2

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ☒ ihned po uzavření této smlouvy
 - ☐ 1 rok po uzavření této smlouvy
 - ☐ 3 roky po uzavření této smlouvy
 - ☐ 5 let po uzavření této smlouvy
 - ☐ 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: 27. 5. 2010

.....
Nabyvatel

.....
Autor

Abstrakt:

Předkládaná práce se zabývá problematikou senzorů plynů, jejich konstrukcí a metodikou testování. Základním zaměřením práce je návrh a realizace stanice pro jednoduché testování vodivostních senzorů plynů. Celá stanice je koncipována jako virtuální měřicí přístroj ovládaný prostřednictvím PC v prostředí LabView. Stanice umožňuje míchání libovolných dvou plynů na požadovanou koncentraci a měření základních vodivostních charakteristik tlustovrstvých a tenkovrstvých senzorů plynů. Centrální komunikační rozhraní a modulární koncepce umožňují do budoucna snadné rozšiřování možností celého zařízení. Najednou je možné testovat až 8 senzorů umístěných ve dvou pouzdrech typu TO-12.

Abstract:

This work deals with branch of gas sensors, their construction and methodology of testing. The general aim is a design and implementation of a station for simple testing of conduction gas sensors. The whole station is conceived as virtual measuring apparatus, operated by PC in LabView environment. The station enables mixing of any two gases at concentration demanded and measuring of the basic conduction characteristics of the thick-film and thin-film gas sensors. The central communication interface and modular conception enable easy expansion of possibilities of the whole apparatus in the future. It is possible to measure up to eight gas sensors split into two TO-12 packages simultaneously.

Klíčová slova:

Detekce plynu, senzor plynu, polovodičový senzor, vodivostní senzor, testovací stanice, plynová komůrka.

Keywords:

Gas detection, gas sensor, semiconductor sensor, conductivity sensor, test station, gas chamber.

Bibliografická citace díla:

PYTLÍČEK, Z. Senzory plynů, jejich konstrukce a testování. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 67 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Prášek, Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti díla:

Prohlašuji, že jsem tuto vysokoškolskou kvalifikační práci na téma Senzory plynů, jejich konstrukce a testování vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce, s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 27. 5. 2010

.....

Poděkování:

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Janu Práškov, Ph.D. za metodické a cíleně orientované vedení při plnění úkolů realizovaných v průběhu zpracovávání diplomové práce.

Obsah

ÚVOD.....	11
1. ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ SENZORŮ PLYNŮ.....	13
1.1. Elektrochemické (potenciometrické a amperometrické).....	13
1.2. Chemokondenzátory (chemokapacity).....	14
1.3. Chemodiody a chemotranzistory.....	14
1.4. Teplotní chemické senzory.....	15
1.5. Gravimetrické chemické senzory.....	15
1.6. Optické chemické senzory.....	16
1.7. Biosenzory.....	16
1.8. Chemické vodivostní senzory (CHVS, chemorezistory).....	17
1.8.1. Základní princip.....	17
1.8.2. Konstrukční uspořádání.....	17
1.8.3. Přístupy pro zlepšování vlastností vodivostních senzorů plynů.....	19
2. VODIVOSTNÍ SENZORY PLYNŮ, JEJICH ZÁKLADNÍ PARAMETRY A CHARAKTERISTIKY PRO TESTOVÁNÍ.....	21
2.1. Základní měřené charakteristiky.....	21
2.2. Další důležité parametry sledované u vodivostních senzorů plynů.....	22
2.2.1. Rychlost odezvy vodivostního senzoru na změnu atmosféry.....	22
3. VOLBA ZÁKLADNÍHO KONCEPTU STANICE PRO TESTOVÁNÍ SENZORŮ PLYNŮ.....	23
3.1. Přehled základních požadavků na měřicí stanici.....	23
3.2. Volba koncepce pro konstrukci testovací stanice.....	24
4. ROZBOR ŘEŠENÍ JEDNOTLIVÝCH MODULŮ STANICE.....	26
4.1. Systém plynového hospodářství.....	26
4.2. Centrální komunikační jednotka.....	28
4.3. Požadavky na zdroj napájení.....	30
4.4. Hardware pro měření základních charakteristik vodivostního senzoru plynů 31	
4.4.1. Problematika regulace teploty topného elementu.....	32
4.4.2. Říditelný zdroj proudu pro topný element.....	34
4.4.3. Problematika měření rezistivity aktivní vrstvy senzoru plynů.....	36
4.5. Softwarové vybavení – vývojové prostředí LabView 8.0.....	37
5. REALIZACE HARDWARE STANICE PRO TESTOVÁNÍ SENZORŮ PLYNŮ.....	41
.....	42
5.1. Konstrukce systému pro míchání plyné směsi.....	42
5.2. Konstrukce napájecího zdroje zařízení.....	44
5.3. Konstrukce centrální komunikační jednotky.....	45
5.4. Konstrukce měřicího kanálu.....	45
5.5. Finální uspořádání měřicí stanice.....	46
6. OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI STANICE A SOUHRN HLAVNÍCH VÝSLEDKŮ PRÁCE.....	47
6.1. Ověření funkčnosti pro TLV a TNV topný element.....	47
6.2. Ověření měření rezistivity aktivní vrstvy senzoru.....	50
7. ZÁVĚR.....	51

8.	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	52
9.	PŘÍLOHY	54

Seznam tabulek

TAB. 1.1: PRINCIPY, MĚŘENÉ VELIČINY A TYPICKÉ PŘÍKLADY CHEMICKÝCH SENZORŮ PLYNŮ [1]	13
TAB. 3.1: NEJBĚŽNĚJŠÍ HODNOTY PARAMETRŮ TLV A TNV SENZORŮ	23
TAB. 4.1: VYBRANÉ TYPY PRŮTOKOVÝCH SYSTÉMŮ A JEJICH ZÁKLADNÍ TECHNICKÉ ÚDAJE [11]	27
TAB. 4.2: SOUHRN POŽADAVKŮ NA NAPÁJECÍ ZDROJ	31
TAB. 4.3: TEPLOTNÍ SOUČINITELÉ ODPORU PRO Pt TERMISTOR DLE IEC NORMY. PLATÍ PRO $R_0 = 100 \Omega$ A $T_0 = 273,15 \text{ K} = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ [15]	32

Seznam obrázků

OBR. 1.1: UKÁZKA KONSTRUKCE TLUSTOVRSTVÉHO SENZORU PLYNU [2].	13
OBR. 1.2: CHEMOKONDENZÁTOR: A) STRUKTURA, B) TYPICKÁ PŘEVODNÍ CHARAKTERISTIKA [1].	14
OBR. 1.3: PŘÍKLAD STRUKTURY ORGANICKÉ CHEMODIODY [1].	14
OBR. 1.4: ŘEZ STRUKTUROU ISFET A PŘEVODNÍ CHARAKTERISTIKA [1].	15
OBR. 1.5: USPOŘÁDÁNÍ PELISTORU [2].	15
OBR. 1.6: PROVEDENÍ SENZORU SAW [2].	16
OBR. 1.7: PRINCIPÁLNÍ SCHÉMA BIOSENZORU [6].	16
OBR. 1.8: ZNÁZORNĚNÍ PŘENOSU ELEKTRONŮ MEZI ADSORBOVANÝMI MOLEKULAMI A POLOVODIČOVÝM POVRCHEM [3], [4].	17
OBR. 1.9: KONSTRUKČNÍ USPOŘÁDÁNÍ A UKÁZKA POUZDŘENÍ ČTYŘ TNV SENZORŮ PLYNŮ V POUZDŘE TO-12 PODLE [4].	18
OBR. 1.10: PŘÍKLAD REALIZACE TLV SENZORU NA KORUNDOVÉ KERAMICE PODLE [6].	18
OBR. 1.11: UKÁZKA KOMERČNĚ VYRÁBĚNÝCH SENZORŮ PLYNŮ OD FIRMY FIGARO [7].	19
OBR. 2.1: UKÁZKA ZMĚNY CITLIVOSTI SnO_2 SENZORU PRO RŮZNÉ TEPLoty AKTIVNÍ VRSTVY PŘI KONSTANTNÍ KONCENTRACI ANALYZOVANÉHO PLYNU [6].	21
OBR. 2.2: KALIBRAČNÍ KŘIVKY SnO_2 SENZORU VYBAVENÉHO SOL-GEL TECHNOLOGIÍ NA CO PRO KONCENTRACE 500 PPB AŽ 10 000 PPM, S CH_4 JAKO INTERFERUJÍCÍM PLYNEM (VLEVO) A ODEZVY NA NO_2 (VPRÁVO) [6].	21
OBR. 2.3: ČASY ODEZVY PRO 50 % ZMĚNU REZISTIVITY SENZORU SnO_2 PŘI PŮSOBNÍ RŮZNÝCH PLYNŮ [6].	22
OBR. 3.1: SCHÉMATICKÉ USPOŘÁDÁNÍ VODIVOSTNÍHO SENZORU PLYNŮ.	23
OBR. 3.2: BLOKOVÉ USPOŘÁDÁNÍ MODULOVÉ KONCEPCE CELÉ MĚŘICÍ STANICE.	25
OBR. 3.3: CELKOVÝ POHLED NA SESTAVU KONSTRUOVANÉ MĚŘICÍ STANICE.	25
OBR. 4.1: FLOW SYSTÉMY OD FIRMY ALICAT SCIENTIFIC [10].	26
OBR. 4.2.: BLOKOVÉ SCHÉMA CENTRÁLNÍ KOMUNIKAČNÍ JEDNOTKY A PŘIPOJENÝCH PERIFERIÍ.	28
OBR. 4.3: ZNÁZORNĚNÍ ZAPOJENÍ SPI KOMUNIKACE PRO JEDNU MASTER A TŘI SLAVE JEDNOTKY.	29
OBR. 4.4: ZMĚŘENÉ PARAMETRY POUŽITÝCH SOLENOIDOVÝCH VENTILŮ – VENTIL TYP D298, CÍVKA SÉRIE 7200.	30
OBR. 4.5: ZJEDNODUŠENÉ BLOKOVÉ SCHÉMA NAVRHOVANÉHO NAPÁJECÍHO ZDROJE. ..	31
OBR. 4.6: BLOKOVÉ SCHÉMA USPOŘÁDÁNÍ MĚŘICÍHO MODULU.	32

OBR. 4.7: ZMĚŘENÝ PRŮBĚH REZISTIVITY TOPNÉHO ELEMENTU TLV SENZORU PRO SKOKOVOU ZMĚNU PROUDU Z 0 NA 250 mA. REZISTIVITA ELEMENTU PŘI POKOJOVÉ TEPLOTĚ JE 10,4 Ω .	33
OBR. 4.8. SCHÉMATICKÉ ZNÁZORNĚNÍ POROVNÁVÁNÍ A NASTAVOVÁNÍ TEPLoty TOPNÉHO ELEMENTU.	34
OBR. 4.9. ZJEDNODUŠENÉ SCHÉMA ZAPOJENÍ ŘIDITELNÉHO PROUDOVÉHO ZDROJE URČENÉHO PRO TOPNÝ ELEMENT.	35
OBR. 4.10. SIMULACE SCHOPNOSTI ŘIDITELNÉHO PROUDOVÉHO ZDROJE (DLE OBR. 4.9) DODÁVAT KONSTANTNÍ PROUD PRO RŮZNĚ	35
OBR. 4.11. SIMULACE SCHOPNOSTI ŘIDITELNÉHO PROUDOVÉHO ZDROJE (DLE OBR. 4.9) NASTAVOVAT PROUD PRO RŮZNĚ VELKÉ ZÁTĚŽE.	36
OBR. 4.12. ZDROJ KONSTANTNÍHO PROUDU S DIFERENČNÍM ZESILOVAČEM PRO MĚŘENÍ ODPORŮ AKTIVNÍ VRSTVY V ŘÁDECH $M\Omega$. SIMULACE STEJNOSMĚRNÉHO BODU A ODEČTENÍ SVODOVÝCH PROUDŮ.	37
OBR. 4.13. ZDROJ KONSTANTNÍHO PROUDU S DIFERENČNÍM ZESILOVAČEM PRO MĚŘENÍ ODPORŮ AKTIVNÍ VRSTVY V ŘÁDECH $M\Omega$. SIMULACE STEJNOSMĚRNÉHO BODU A ODEČTENÍ SVODOVÝCH PROUDŮ.	37
OBR. 4.14: UKÁZKA JEDNODUCHÉHO OVLÁDACÍHO TERMINÁLU PRO COM PORT (DOSTUPNÝ NA HTTP://WWW.HW.CZ).	38
OBR. 4.15: UKÁZKA PALETY S VÝBĚREM RŮZNÝCH OVLÁDACÍCH PRVKŮ PRO REPREZENTACI ČÍSELNÝCH HODNOT NA PŘEDNÍM PANELU.	39
OBR. 4.16: UKÁZKA PŘEDNÍHO PANELU VIRTUÁLNÍHO PŘÍSTROJE VYTVOŘENÉHO V LABVIEW PRO ŘÍZENÍ SYSTÉMU PLYNOVÉHO HOSPODÁŘSTVÍ.	39
OBR. 4.17: UKÁZKA PALETY S VÝBĚREM RŮZNÝCH OVLÁDACÍCH PRVKŮ PRO REPREZENTACI ČÍSELNÝCH HODNOT NA PŘEDNÍM PANELU.	40
OBR. 4.18: UKÁZKA ČÁSTI PROGRAMOVÉHO KÓDU PRO NAVÁZÁNÍ SPOJENÍ SE STANICÍ PROSTŘEDNICTVÍM VIRTUÁLNÍHO COM PORTU VYTVOŘENÉHO ZA POMOCÍ USB PŘEVODNÍKU FT232.	40
OBR. 5.1: POHLED NA VNITŘNÍ USPOŘÁDÁNÍ PŘÍSTROJE	41
OBR. 5.2: POROVNÁNÍ VELIKOSTI VÝSLEDNÉHO PROGRAMOVÉHO KÓDU PRO MCU S POUŽITÍM RŮZNÝCH VERZÍ KOMPILÁTORŮ OD FIRMY MICROCHIP [24].	41
OBR. 5.3: PROGRAMÁTOR MCU PRESTO OD FIRMY ASIX S.R.O.	42
OBR. 5.4: NÁVRH PLYNOVÉ KOMŮRKY V PROGRAMU SOLIDWORKS.	43
OBR. 5.5: VÝSLEDNÁ PODOBA VYROBENÉ PLYNOVÉ KOMŮRKY.	43
OBR. 5.6: FINÁLNÍ OSAZENÁ DPS PRO ZDROJ NAPÁJENÍ.	44
OBR. 5.7: FINÁLNÍ OSAZENÁ DPS PRO CENTRÁLNÍ KOMUNIKAČNÍ JEDNOTKU.	45
OBR. 5.8: POHLED NA OSAZENOU SPODNÍ STRANU CENTRÁLNÍ KOMUNIKAČNÍ JEDNOTKY.	45
OBR. 5.9: FINÁLNÍ PODOBA OSAZENÉ DPS MODULU MĚŘICÍHO KANÁLU.	46
OBR. 5.10: POHLED NA PŘEDNÍ PANEL MĚŘICÍHO PŘÍSTROJE.	46
OBR. 5.11: POHLED NA ZADNÍ PANEL MĚŘICÍHO PŘÍSTROJE.	46
OBR. 5.12: POHLED NA VNITŘNÍ USPOŘÁDÁNÍ PŘÍSTROJE	47
OBR. 5.13: POHLED NA REÁLNÉ USPOŘÁDÁNÍ SYSTÉMU PLYNOVÉHO HOSPODÁŘSTVÍ.	47
OBR. 6.1: ZMĚŘENÁ ZÁVISLOST ODPORU TOPNÉHO ELEMENTU TLV SENZORU PRO RŮZNÉ PROUDY.	48
OBR. 6.2: UKÁZKA TOPNÉHO ELEMENTU TLV SENZORU PŘI VYSOKÉ TEPLOTĚ.	48
OBR. 6.3: ZMĚŘENÁ ZÁVISLOST ODPORU TOPNÉHO ELEMENTU TLV SENZORU PŘI POKLESU VYHŘÍVACÍHO PROUDU Z 250 mA NA 1 mA.	48
OBR. 6.4: UKÁZKA NAMĚŘENÉ HODNOTY ODPORU TOPNÉHO ELEMENTU TLV SENZORU PŘI KONSTANTNÍM PROUDU 5 mA.	49
OBR. 6.5: UKÁZKA NAMĚŘENÉ HODNOTY ODPORU TOPNÉHO ELEMENTU TNV SENZORU PŘI KONSTANTNÍM PROUDU 0,5 mA.	49

OBR. 6.6: UKÁZKA NAMĚŘENÉ HODNOTY ODPORU TOPNÉHO ELEMENTU TNV SENZORU Z OBR. 6.5 BEZPROSTŘEDNĚ PO SKOKU Z 0,5 mA NA 3 mA.	50
---	----

Seznam příloh

PŘÍLOHA 1: PŘEHLED ZÁKLADNÍCH PŘÍKAZŮ PRO KOMUNIKACI S JEDNOTLIVÝMI SUBSYSTÉMY TESTOVACÍ STANICE	54
PŘÍLOHA 3: DPS PRO CENTRÁLNÍ KOMUNIKAČNÍ JEDNOTKU - ČÁST 1/2 1:1 (75 MM X 100 MM)	56
PŘÍLOHA 4: OSAZOVACÍ PLÁN THD SOUČÁSTEK PRO CENTRÁLNÍ KOMUNIKAČNÍ JEDNOTU - ČÁST 1/2	56
PŘÍLOHA 5: OSAZOVACÍ PLÁN SMD SOUČÁSTEK PRO CENTRÁLNÍ KOMUNIKAČNÍ JEDNOTU - ČÁST 1/2	56
PŘÍLOHA 6: SEZNAM SOUČÁSTEK POUŽITÝCH PRO CENTRÁLNÍ KOMUNIKAČNÍ JEDNOTKU – ČÁST 1/2.....	57
PŘÍLOHA 7: SCHÉMA ZAPOJENÍ CENTRÁLNÍ KOMUNIKAČNÍ JEDNOTKY ČÁST 2/2.....	57
PŘÍLOHA 8: DPS PRO CENTRÁLNÍ KOMUNIKAČNÍ JEDNOTKU - ČÁST 2/2 1:1 (75 MM X 100 MM)	58
PŘÍLOHA 9: OSAZOVACÍ PLÁN THD SOUČÁSTEK PRO CENTRÁLNÍ KOMUNIKAČNÍ JEDNOTU - ČÁST 2/2	58
PŘÍLOHA 10: OSAZOVACÍ PLÁN SMD SOUČÁSTEK PRO CENTRÁLNÍ KOMUNIKAČNÍ JEDNOTU - ČÁST 2/2	59
PŘÍLOHA 11: SEZNAM SOUČÁSTEK POUŽITÝCH PRO CENTRÁLNÍ KOMUNIKAČNÍ JEDNOTKU – ČÁST 2/2	59
PŘÍLOHA 12: SCHÉMA ZAPOJENÍ NAPÁJECÍ ZDROJ	60
PŘÍLOHA 13: DPS PRO NAPÁJECÍ ZDROJ 1:1 (95 MM X 95 MM).....	61
PŘÍLOHA 14: OSAZOVACÍ PLÁN THD SOUČÁSTEK PRO NAPÁJECÍ ZDROJ.....	61
PŘÍLOHA 15: OSAZOVACÍ PLÁN SMD SOUČÁSTEK PRO NAPÁJECÍ ZDROJ	61
PŘÍLOHA 16: SEZNAM SOUČÁSTEK POUŽITÝCH PRO NAPÁJECÍ ZDROJ	62
PŘÍLOHA 18: DPS PRO MĚŘICÍ KANÁL 1:1 (60 MM X 100 MM)	64
PŘÍLOHA 19: OSAZOVACÍ PLÁN THD SOUČÁSTEK PRO MĚŘICÍ KANÁL	64
PŘÍLOHA 20: OSAZOVACÍ PLÁN SMD SOUČÁSTEK PRO MĚŘICÍ KANÁL	64
PŘÍLOHA 21: SEZNAM SOUČÁSTEK POUŽITÝCH PRO MĚŘICÍ KANÁL	65
PŘÍLOHA 22: VÝKRES PRO ZADÁNÍ VÝROBY VÍKA PLYNOVÉ KOMŮRKY	66
PŘÍLOHA 23: VÝKRES PRO ZADÁNÍ VÝROBY SPODNÍ ČÁSTI PLYNOVÉ KOMŮRKY	67

Úvod

V mnoha oblastech lidské činnosti je stále častěji třeba rychle a přesně analyzovat složení plyných směsí, nebo upozornit na přítomnost nebezpečné látky. Proto se v mnoha laboratořích na celém světě vědci soustředí na vytvoření malých a levných senzorů plynů, které by nahradily sice velmi výkonné, ale drahé a rozměrné plynové analyzátory, jako například chromatografy a chemické spektrometry. Plyné směsi se analyzují nejen v průmyslové výrobě, ale stále častěji i v běžném životě. Malé senzory plynů se uplatňují jako detektory znečištění okolního vzduchu pro řízení oběhu vzduchu v automobilech, u klimatizačních systémů, v alkoholtesterech, při kontrole čistoty životního prostředí, při kontrole kvality a stáří potravin, pro detekci nebezpečných těkavých látek v okolí a v mnoha dalších aplikacích. Byla již vyvinuta složitá senzorová pole nazývaná elektronický nos (eNose) [1]-[3], které za pomoci matematických modelů neuronových sítí dokáží analyzovat i složitější plyné směsi. Například podle předložené vůně rozezná elektronický nos jednotlivé potraviny s daleko větší přesností, než by to kdy dokázal člověk bez elektronických pomůcek [1], [3], [4]. Velký význam z tohoto pohledu uplatnění mají polovodičové chemické vodivostní senzory (CHVS).

Hlavním cílem této práce je návrh zařízení pro jednoduché testování a kalibraci senzorů plynů založených na principu změny vodivosti aktivní vrstvy. Tato vrstva mění svoji vodivost v závislosti na složení a koncentracích plyného prostředí v bezprostředním okolí senzoru. Proto jsou zde popsány nejběžnější metody používané pro testování měřicích schopností těchto senzorů. Běžně se aktivní vrstva vyrábí z polovodičových materiálů, jako jsou SnO_2 , ZnO , TiO_2 [1]-[6], polymerních materiálů [2], [3] a v poslední době i za využití nanomateriálů a nanostruktur [2], [3]. Provedení těchto senzorů může být řešeno jak v tlustovrstvé (TLV) tak v tenkovrstvé (TNV) technologii. Od zvolené výrobní technologie se odvíjí možnost integrace v systému a energetická náročnost senzorů. Tento krátký výčet provedení má však velký vliv na rozptyl parametrů těchto senzorů a důsledkem jsou velké nároky na univerzálnost celé testovací stanice. Pro zvýšení citlivosti a selektivity vodivostního senzoru plynů hraje kromě materiálu aktivní vrstvy velkou roli její pracovní teplota. Za účelem vyhřívání aktivní vrstvy je proto na senzoru umístěn topný element (tzv. heater). Při měření plynu se aktivní vrstva senzoru vyhřívá na teplotu, při které má pro daný plyn nejlepší citlivost a selektivitu. Pro běžné použití a komerční senzory plynu je předepsáno elektrické napětí [7], které je třeba přiložit na topný element pro dosažení této teploty. Narozdíl od běžného používání senzorů plynu, kdy je pracovní teplota dosažena nastavením konstantního průtoku elektrického proudu topným elementem, je pro testovací stanici nutné, aby mohla tuto teplotu přesně měnit a udržovat ji konstantní po celou dobu měření, při kterém je zkoumána citlivost a selektivita. V práci je proto podrobně řešeno jak tohoto cíle dosáhnout za pomoci nastavitelného proudového zdroje a digitální PID regulace a to jak pro TNV senzory, u kterých se vyhřívací proudy pohybují do 10 mA, tak pro TLV senzory, u kterých mohou dosahovat až 1 A. Velký je i rozptyl změny vodivosti aktivní vrstvy v důsledku okolní atmosféry. Její odpor se může pohybovat od jednotek ohmů až po stovky megaohmů. Měření odporu aktivní vrstvy je v rámci práce také řešeno. Z důvodu co největší univerzálnosti celého zařízení je návrh koncipován jako modulární a v podobě virtuálního přístroje, kdy je celý

měřicí HW ovládán prostřednictvím PC v prostředí LabView od firmy National Instruments. Jednotlivé měřicí kanály je možno v budoucnu nezávisle vylepšit. Rovněž je možné využít vlastností ovládacího software a obohatit ovládací program o další prvky či zakomponovat další externí měřicí zařízení do prostředí LabView. Nedílnou součástí celého zařízení je systém pro míchání plynné směsi, která je přiváděna do komůrky s umístěnými senzory. Toto míchání je realizováno za pomoci několika solenoidových ventilů a dvou digitálně ovládaných hmotnostních regulátorů průtoku plynu. Navržená testovací stanice umožňuje současné měření charakteristik až na osmi vodivostních senzorech plynů upevněných ve dvou pouzdrech typu TO-12. Zařízením pro kalibraci a testování senzorů plynů je navrženo s ohledem na požadavky Laboratoře elektrochemických senzorů a nanosenzorů na Ústavu mikroelektroniky VUT v Brně. Zařízení v praxi usnadní testování senzorů plynů například při hledání nového materiálu aktivní vrstvy pro zvýšení citlivosti, nebo vyšší selektivnost senzoru.

1. Základní rozdělení senzorů plynů

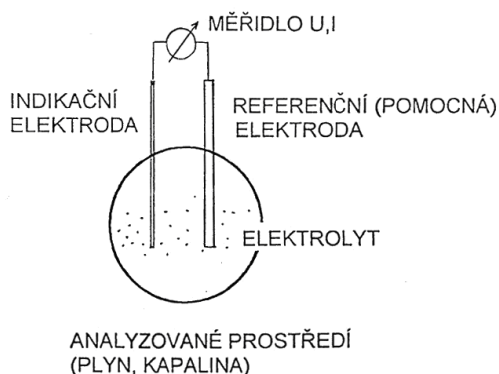
Principem fungování chemických senzorů určených pro detekci plynných směsí se mimo jiné zabývá obor elektrochemie. Jsou zde zkoumány fyzikálně chemické vlastnosti látek. Dle principu detekce chemické veličiny lze senzory plynů rozdělit do několika základních skupin, jak je přehledně uvedeno v tab. 1.1 [1], [2]. Selektivita a citlivost senzoru plynů závisí na povaze reakčního mechanismu. V ideálním případě reaguje senzor pouze na jednu chemickou látku a podává hodnotnou informaci o jejím množství v celém rozsahu koncentrací [2].

Tab. 1.1: Principy, měřené veličiny a typické příklady chemických senzorů plynů [1]

Princip	Měřená veličina	Typický senzor
vodivostní	odpor/vodivost	tenkovrstvý oxidový senzor plynu
kapacitní	kapacita/náboj	polymerový senzor vlhkosti
kalorimetrický (teplotní)	teplo/teplota	pelistor – senzor plynu
gravitační	hmota	piezoelektrický nebo saw senzor
optický	délka stopy, absorpce	IR detektor pro metan

1.1. Elektrochemické (potenciometrické a amperometrické)

Jedná se o senzory plynů založených na elektrochemických principech objevených Jaroslavem Hejrovským. Pro měření jsou zapotřebí minimálně dvě elektrody (pracovní, referenční - neovlivnitelná změnami v analytu) propojené elektrolytem (plynem, kapalinou), popřípadě další elektroda (pomocná) pro vyloučení úbytku napětí mezi pracovní a referenční elektrodou. Typické uspořádání dvoelektrodového zapojení je zobrazeno na obr. 1.1 [2]. Elektrodové systémy těchto senzorů nabývají nejrůznějších geometrických uspořádání a různé použité materiály. Tyto senzory pracují nejčastěji v amperometrickém režimu. Probíhající redoxní reakce na povrchu pracovní elektrody určují druh a koncentraci zkoumaného plynu. Každý plyn má svůj elektrovodný potenciál. Velikost proudové odezvy je závislá na koncentraci měřeného plynu [2],[6]. Další teorie k problematice elektrochemické analýzy je možné najít v [2] a [8].

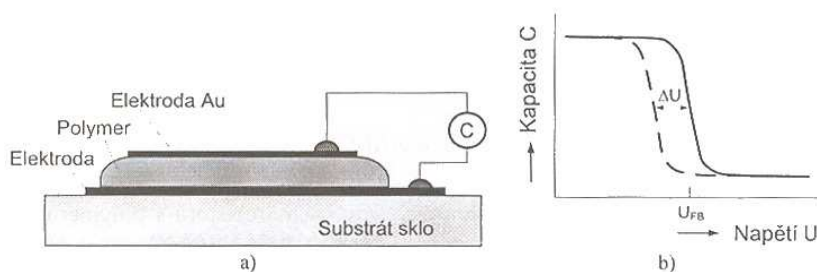


Obr. 1.1: Ukázka konstrukce tlustovrstvého senzoru plynu [2].

Výhodou těchto senzorů jsou nízké pořizovací a provozní náklady, vysoká citlivost a selektivita. Tyto senzory jsou pro některé aplikace nenahraditelné pro svoji schopnost detekce iontů. Jsou schopny pracovat za normální pokojové teploty. Nevýhodou je časová nestálost odezvy a nároky na skladování. Většinou se jedná o senzory na jedno použití.

1.2. Chemokondenzátory (chemokapacitory)

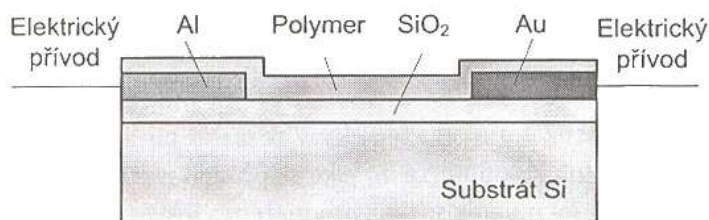
Působením plynného prostředí na chemicky citlivou vrstvu umístěnou mezi dvěma elektrodami senzoru se mění její dielektrická konstanta ϵ (permitivita). Princip měření je založen na měření kapacity této vrstvy, jak je ukázáno na obr. 1.2 [1]. Běžné kapacitní změny chemokondenzátorů jsou v řádech pF, přičemž silně závisí na pracovní frekvenci a na okolních podmínkách, jako například na teplotě a vlhkosti [1]. Zvlášť vhodné je použití těchto senzorů pro rychle sorbující polární molekuly plynu (měření vlhkosti). Jako citlivá chemická vrstva se u anorganických látek využívá absorpčních vlastností tenkých vrstev oxidů Al_2O_3 a Ta_2O_5 nebo různé polymerové vrstvy [1], [2].



Obr. 1.2: Chemokondenzátor: a) struktura, b) typická převodní charakteristika [1].

1.3. Chemodiody a chemotranzistory

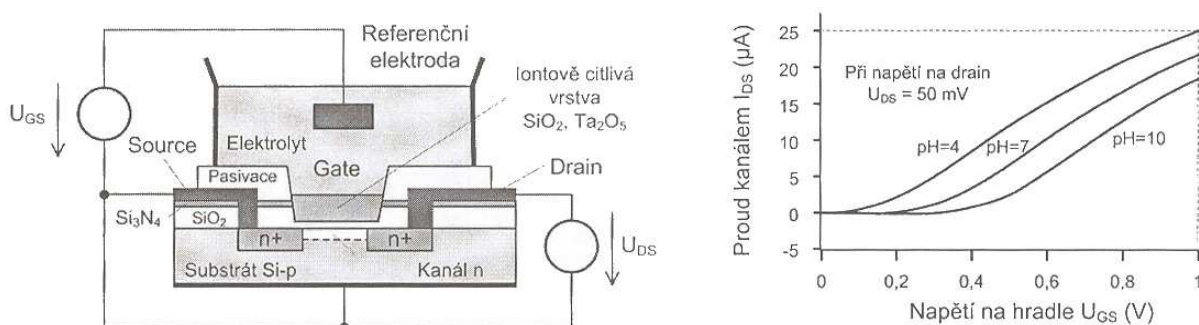
Jako chemodiody se používají schottkyho diody. VA-charakteristiky této diody jsou závislé na přítomnosti chemické látky (plynu) působící na přechod pn. Činnost vodivých polymerů se mění při přítomnosti organických par [9]. Jedna elektroda je z kovu (Au) a druhá z polymerového polovodiče typu p. Příklad chemodiody viz obr. 1.3 [1].



Obr. 1.3: Příklad struktury organické chemodiody [1].

Na podobném principu jako chemodiody pracují i chemotranzistory vycházející ze struktury MOS, kde je hradlo gate nahrazeno chemocitlivou vrstvou. Využívá se opět změny parametrů elektrických charakteristik tranzistoru v závislosti na působení okolního plynu. Některé fyzikální parametry tranzistorů MOS, např. proud kanálem I_D , napětí na hradle U_G jsou závislé na vlivech okolního prostředí [6]. V praxi se nejvíce využívá změna parametru tranzistoru MOSFET, konkrétně změna výstupní práce v závislosti na plynném okolí, kterou

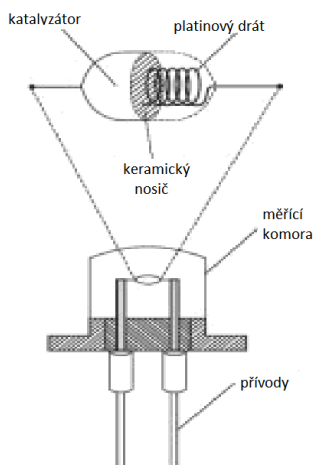
Lze měřit jako změnu prahového napětí U_t , nebo proudu kanálem I_D . Výhodou tohoto měření oproti chemorezistorům je menší zkreslení užitečného signálu (nižší šum) [1], [6]. Podle konstrukce lze MOSFET senzory plynů rozdělit na OGFET senzor plynů (Open Gate FET), ADFET – senzor polárních plynů (Adsorption FET), SAFET – senzor polárních plynů (Surface Accessible FET), CFT – senzor plynů (Charge Flow Transistor), ISFET – senzor iontů a pH (Ion Sensitive FET), atd. [1]. Řez strukturou ISFET a typická převodní charakteristika pro měření hodnoty pH je zobrazeno na obr. 1.4 [1].



Obr. 1.4: Řez strukturou ISFET a převodní charakteristika [1].

1.4. Teplotní chemické senzory

Teplotní senzor plynu je založen na měření změny teploty, která je způsobena uvolněnou energií při chemické reakci měřené látky s aktivním materiálem. Měří se změna teploty. Jedná se o jeden z nejstarších typů chemických senzorů. Nejvíce používané jsou senzory vyrobené na bázi materiálu SnO₂ naneseného na tenký platinový drátek. Platinový drátek slouží pro vyhřátí na pracovní teplotu (senzor má vůči měřenému plynu nejvyšší citlivost) a zároveň jako TCR (teplotní čidlo). Konstrukce těchto senzorů je známa pod názvem Pelistor (viz Obr. 1.5) [2], [6].

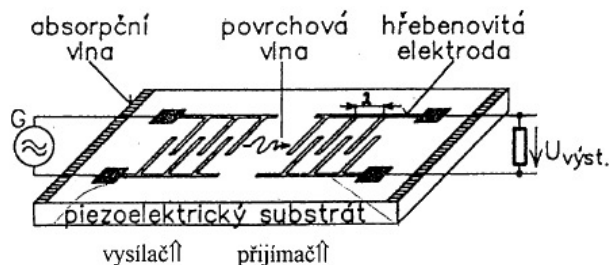


Obr. 1.5: Uspořádání pelistoru [2].

1.5. Gravimetrické chemické senzory

Gravimetrické chemické senzory pracují na principu změny tuhosti aktivní vrstvy způsobené vlivem měřené veličiny (plyn). Senzor se skládá ze dvou rezonátorů většinou

tvořených hřebínkovými (interdigitálními) dvojelektrodami. Tyto dva rezonátory jsou propojeny chemicky aktivní vrstvou, kterou se šíří povrchová akustická vlna (viz obr. 1.6) [1]. Jeden rezonátor slouží jako zdroj a druhý jako přijímač ultrazvukové vlny (10 MHz až 2 GHz). Měří se útlum této vlny v aktivní vrstvě (chemicko-gravimetrický převodník). Tyto senzory jsou známy pod označením SAW (surface acoustic wave) [1], [2].



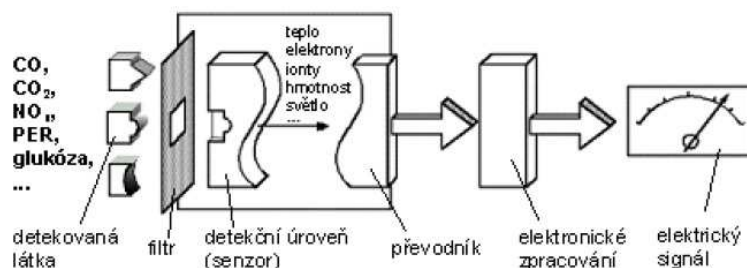
Obr. 1.6: Provedení senzoru SAW [2].

1.6. Optické chemické senzory

Funguje na principu modulace světelného záření průchodem skrz měřené prostředí. U většiny těchto senzorů se porovnávají dva signály. Změna optického signálu způsobená průchodem látkou, která se mění interakcí s plynem a referenčním prostředím, které optické vlastnosti nemění. Měří se například útlum, polarizace. Jako zdroj spojitých nebo impulsních optických signálů se používají LED diody, polovodičové lasery a další. Pro detekci světelného záření se používají například PIN diody, fotodiody, fototranzistory. Výhody jsou odolnost vůči korozi, možnost použití v explozivních a hořlavých prostředích. Malé rozměry a hmotnost. Nevýhodami těchto senzorů jsou vliv radioaktivního záření, vliv teploty, chemické vlivy aj [1], [2], [6].

1.7. Biosenzory

Jedná se o speciální typ senzoru, který sestává z biologických, chemických a elektronických součástí, popřípadě jiné. Aktivní část (receptor) je citlivá na biologické částice. Využívá se především membrán, které reagují pouze s určitým typem molekul. Tuto membránu si lze představit jako vysoce selektivní sítko (viz. obr. 1.7). Pro převod neelektrické veličiny na elektrickou lze využít většinu výše popsaných principů [1], [6].

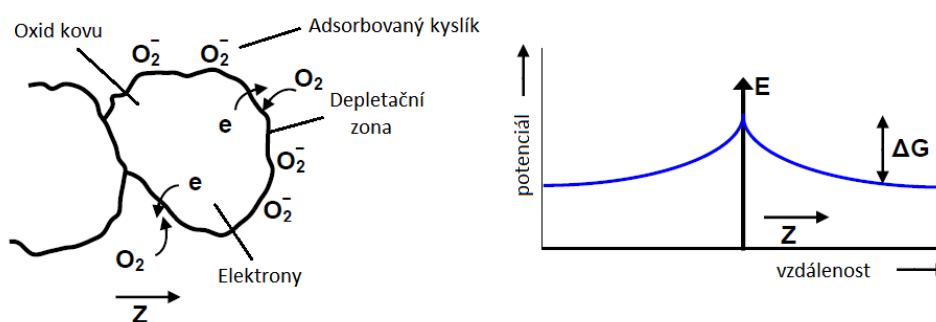


Obr. 1.7: Principiální schéma biosenzoru [6].

1.8. Chemické vodivostní senzory (CHVS, chemorezistory)

1.8.1. Základní princip

Chemické vodivostní senzory patří k senzorům plynů založených na principu změny vodivosti aktivní vrstvy v závislosti na druhu a koncentraci okolního plynu. Zvýšení vodivosti aktivní vrstvy přenosem elektronů z okolního plynu je znázorněno na obr. 1.8. Základem je adsorpce (přichycení na povrchu), absorpce (vnikání do objemu) a chemisorpce (vznikání pevných chemických vazeb, redoxní reakce) molekul plynu nebo páry s pevnou látkou aktivní vrstvy a tím změna její vnitřní a povrchové vodivosti (odporu) aktivní vrstvy. Vodivost roste, nebo klesá podle toho, zda detekovaný plyn dodává nebo odčerpává elektrony. Vodivost závisí na koncentraci měřeného plynu a po navrácení koncentrace na původní hodnotu se vrací i vodivost. Znamená to tedy, že děj změny vodivosti je vratný. Měřením vodivosti resp. elektrického odporu polovodiče lze tedy určit koncentraci plynu oxidačně-redukční povahy. Pro svoji relativně jednoduchou konstrukci a dobré měřicí vlastnosti jsou tyto senzory v dnešní době často využívány.

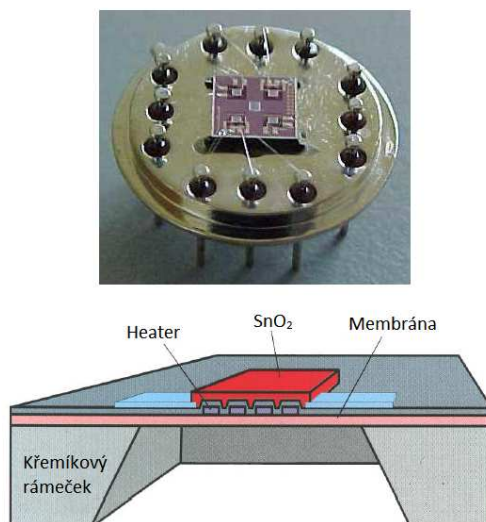


Obr. 1.8: Znáznornění přenosu elektronů mezi adsorbovanými molekulami a polovodičovým povrchem [3], [4].

1.8.2. Konstrukční uspořádání

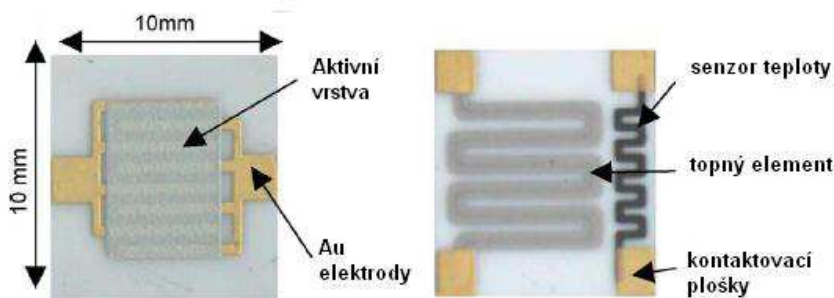
Pro výrobu aktivní vrstvy bývají nejčastěji používány polovodivé oxidy (SnO_2 , ZnO , TiO_2 , $\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$, In_2O_3 atd. [1]-[4]). Vrstva musí být chemicky stálá a nesmí se měnit vlivem okolní atmosféry, například nesmí oxidovat, což u polovodivých oxidů již nemůže nastat. Dále je vhodné, aby byl materiál pórovitý, čímž se zvětší kontaktní plocha a citlivost senzoru. Běžně se aktivní vrstvy vyrábí tenkovrstvou, nebo tlustovrstvou technologií. Selektivnost a citlivost těchto senzorů se upravuje dopanty, katalyzátory, selektivními membránami [1], [2], [6]. Dále je běžnou součástí těchto senzorů topný meandr (např. Pt). Slouží k vyhřátí aktivní vrstvy na určitou teplotu, což způsobí, že atomy jednoho konkrétního detekovaného plynu překonají snadněji aktivační energii chemických reakcí než ostatní. Běžně se používají teploty v rozmezí (20 – 1000 °C) [1], [3], [4], [6]. Každý plyn má pro danou aktivní vrstvu svoji teplotu, kdy se uplatňuje na vodivosti nejvíce. Jako substrát, tj. podkladový materiál pro vytvoření senzoru, se nejčastěji používá pro tlustovrstvou verzi korundová keramika Al_2O_3 a pro tenkovrstvou verzi SiO_2 , popř. Si_3N_4 . Kritériem pro výběr substrátu je co největší tepelná odolnost a co nejmenší ovlivňování složení okolní atmosféry při zahřátí. Příklad provedení tenkovrstvého chemického vodivostního senzoru je na obr. 1.9 [4]. Miniaturizace senzoru

slouží v první řadě ke snížení nároků na napájení pro nízkonákladové aplikace. Pro snížení tepelných ztrát při vyhřívání odvodem tepla je senzor umístěn na tenké membráně, což také zlepšuje jeho tepelnou dynamiku. TNV senzory se běžně vyrábí metodou napařování nebo naprašování a dalšími polovodičovými technikami.



Obr. 1.9: Konstrukční uspořádání a ukázka pouzření čtyř TNV senzorů plynů v pouzdře TO-12 podle [4].

Relativně jednodušší metodou pro výrobu vodivostních senzorů plynů je využití tlustovrstvé technologie. Jako nosič se běžně používá korundový substrát. Pro kontakty se používá Pt nebo Au. Běžně se Pt používá také pro vyhřívací element a SnO_2 jako aktivní vrstva. Příklad uspořádání TLV senzoru je na obr. 1.10. Na tomto obrázku je starší typ senzoru s odděleným senzorem teploty. Novější uspořádání využívá pro měření teploty aktivní vrstvy přímo teplotní závislosti odporu topného elementu.



Obr. 1.10: Příklad realizace TLV senzoru na korundové keramice podle [6].

Podskupinou chemických vodivostních senzorů jsou rezistorové kovové senzory, u kterých dochází ke změně vodivosti způsobené sorpcí plynu na povrchu tenké vrstvičky vodiče. Jako příklad lze uvést částečně krystalický uhlík katalyzovaný Pt, který je citlivý na H_2 . Pro měření postačuje pracovní teplota $110\text{ }^\circ\text{C}$ [2].

Jedním z prvních a nejvýznamnějších výrobců vodivostních senzorů je japonská firma Figaro Engineering Inc. Její senzory se používají pro bezpečnostní systémy, ochranu zdraví a řídicí systémy (viz obr. 1.11) [7].



Obr. 1.11: Ukázka komerčně vyráběných senzorů plynů od firmy FIGARO [7].

Hlavní výhodou vodivostních senzorů je jejich relativně jednoduchá výroba, instalace a provoz, dále malé rozměry a nižší pořizovací cena. Proto je těmto senzorům a měření s nimi věnována větší pozornost v kapitole 2. Samotný návrh testovacího zařízení je zaměřen právě na tyto senzory [1], [2], [6].

1.8.3. Přístupy pro zlepšování vlastností vodivostních senzorů plynů

- **Citlivost senzoru**

Citlivost senzoru plynů lze v první řadě ovlivnit výběrem základního materiálu aktivní vrstvy. Ve většině případů se používá SnO_2 . Je mnoho aplikací kdy je možno použít vhodnější materiál. Příkladem může být vysoká citlivost senzorů na bázi WO_3 při detekcích sloučenin dusíku (NH_3 , N_2H_4 , aj.) [2], nebo použití organicky aktivních vrstev, viz biosenzory.

Další možností jak výrazně zvýšit citlivost senzoru je měření při teplotách aktivní vrstvy pro které dochází pro daný plyn k vyšší chemické reakci [2]. Běžně se používají teploty od 100 do 800 °C [3], [6].

Dosáhnout vyšší citlivosti senzoru lze také úpravou aktivní vrstvy. Jednou z možností je dotace aktivní vrstvy vhodnými dopanty. Sníží se tak koncentrace volných nosičů náboje a tím se cíleně zvýší citlivost vůči určitým plynům. Další možností je nanesení katalyzátoru na povrch aktivní vrstvy a tím snížení aktivační energie spalovacích reakcí, urychlení jejich průběhu a vytvoření větších reaktivních center na povrchu. Dále lze zvýšit možnosti absorpce a chemisorpce zvýšením poréznosti materiálu aktivní vrstvy. Například u senzorů vyrobených tlustovrstvou technologií je ovlivněna malá část povrchové vrstvy, zatímco vodivost spodní oblasti se nezmění. V takové situaci bude navíc spodní vrstva způsobovat nárůst nestability a šumu senzoru. Proto se pro tenké a porézní aktivní vrstvy snižuje šum a zkracuje doba odezvy. Jednou z nevýhod tenkých vrstev je nižší termodynamická stabilita. Další nevýhodou

tenkých vrstev je jejich rychlé nasycení celé tloušťky senzoru při vysoké koncentraci plynu, což má za následek, že se senzor dostane do stavu saturace a není schopen rozlišovat další koncentrace.

- **Selektivita senzoru**

Selektivitu senzoru lze zvýšit nastavením pracovní teploty senzoru tak, aby byla optimální pro detekci látky, kterou chceme sledovat, dále využitím vhodných selektivních dopantů použitím vhodných selektivních membrán fungujících jako molekulová síta, nebo využitím měření střídavým signálem pro měření složek impedance pro danou frekvenci. Tímto způsobem lze výrazně zvýšit selektivitu například u polymerních senzorů. Dalšího zlepšení selektivity lze dosáhnout použitím senzorových polí a současného vyhodnocení signálu ze všech použitých senzorů např. neuronovými sítěmi. Měření v dynamickém režimu, kdy je senzor vystaven střídavě atmosféře a čistému technickému vzduchu [2]. Modulací teploty atd.

- **Zkrácení doby odezvy (doby zotavení)**

Zkrácení doby odezvy lze dosáhnout použitím vhodného katalyzátoru, který zvýší rychlost reakcí nebo ztenčením aktivní vrstvy a zvýšením její poréznosti. Někdy pomůže i zvýšení teploty aktivní vrstvy [2].

- **Snížení meze detekce**

Mez detekce je dána citlivostí, šumem a stabilitou senzoru. Šum lze obecně potlačit nízkoteplotním režimem a nízkým elektrickým odporem vrstvy. Šum může také způsobovat elektromagnetické rušení nebo fotoemise (vystavení senzoru světlu). To lze vyřešit vhodným zapouzdřením a zastíněním [2].

- **Zvýšení časové stability vlastností senzoru**

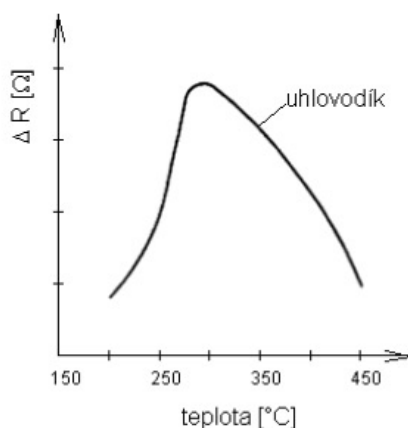
Stabilita je obecně dána chemickou a strukturní stálostí aktivní vrstvy. Aby byl senzor dostatečně stabilní, musí v ideálním případě během výroby dojít k dokončení všech fyzikálně-chemických a krystalografických přeměn v materiálu. Zesílením aktivní vrstvy se zvýší její termodynamická stabilita. To je však na úkor citlivosti, rychlosti odezvy a zvýšení šumu.

2. Vodivostní senzory plynů, jejich základní parametry a charakteristiky pro testování

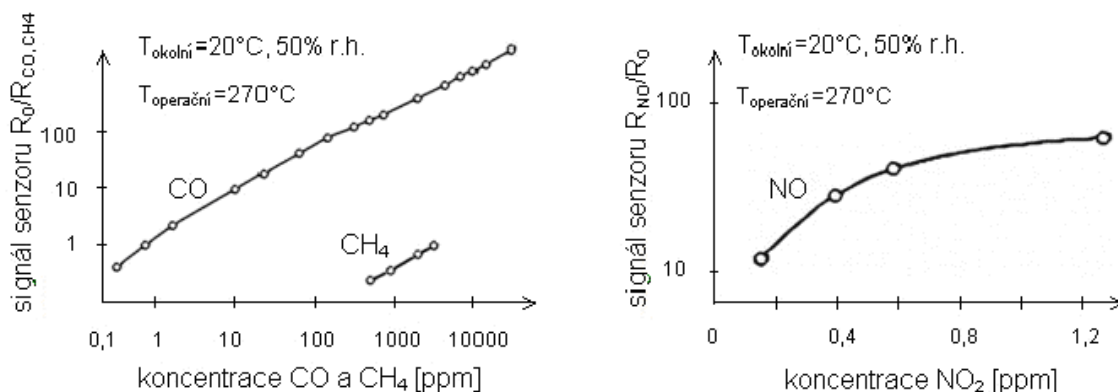
Princip fungování a příklad konstrukce vodivostních senzorů plynů byl popsán v první kapitole. Zde budou uvedeny konkrétní vlastnosti těchto senzorů. Základními parametry senzorů plynů jsou citlivost k detekovanému plynu, selektivita, rychlost odezvy, práh detekce a stabilita uvedených parametrů.

2.1. Základní měřené charakteristiky

Pro chemické vodivostní senzory jsou typické dvě základní charakteristiky. Závislost citlivosti aktivní vrstvy na určitý plyn pro různé teploty senzoru (viz obr. 2.1). Dále se měří změna vodivosti, častěji však rezistivity, v závislosti na koncentraci plynu při určité teplotě senzoru (viz obr. 2.2) [6]. Tyto charakteristiky udávají vhodnost senzoru pro měření požadovaného plynu.



Obr. 2.1: Ukázka změny citlivosti SnO_2 senzoru pro různé teploty aktivní vrstvy při konstantní koncentraci analyzovaného plynu [6].



Obr. 2.2: Kalibrační křivky SnO_2 senzoru vybaveného sol-gel technologií na CO pro koncentrace 500 ppb až 10 000 ppm, s CH_4 jako interferujícím plynem (vlevo) a odezvy na NO_2 (vpravo) [6].

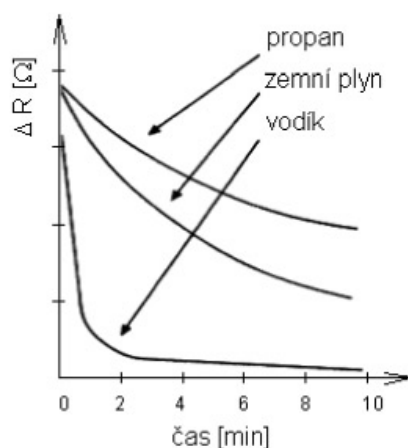
Parametr citlivost senzoru $S(T)$ je definován jako poměr odporu aktivní vrstvy v atmosféře syntetického vzduchu R_{Air} k jejímu odporu v atmosféře detekovaného plynu R_{Gas} při konstantní teplotě (2.1) [2].

$$S(T) = \frac{R_{Air}(T)}{R_{Gas}(T)} \quad [-] \quad (2.1)$$

2.2. Další důležité parametry sledované u vodivostních senzorů plynů

2.2.1. Rychlost odezvy vodivostního senzoru na změnu atmosféry

Neméně důležitým parametrem senzoru je rychlost odezvy resp. zotavení vodivostního senzoru plynů. Lze ji změřit jako dobu potřebnou pro ustálení změny signálu reagující na změnu koncentrace měřeného plynu. Měří se při změnách koncentrace z „čistého“ syntetického vzduchu na danou koncentraci detekovaného plynu resp. naopak. Tato dvojice dynamických parametrů je pro praxi velice důležitá. Udává, za jakou dobu by senzor zareagoval například při úniku nebezpečného plynu. Běžně se udává doba potřebná pro dosažení 90 % změny z celkového rozdílu Air – GAS. Běžná reakční doba vodivostních senzorů plynů bývá kolem 1 minuty (ukázka viz obr. 2.3).



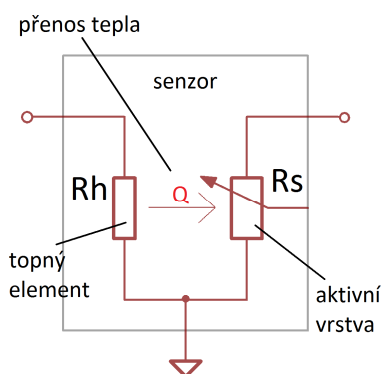
Obr. 2.3: Časy odezvy pro 50 % změnu rezistivity senzoru SnO₂ při působení různých plynů [6].

3. Volba základního konceptu stanice pro testování senzorů plynů

3.1. Přehled základních požadavků na měřicí stanici

Konstruovaná měřicí stanice má sloužit pro testování vodivostních senzorů plynů. Měřeny budou senzory plynů jak v TLV tak TNV provedení. Má být možno měřit současně až 8 senzorů umístěných ve dvou pouzdrech TO-12. Mají být proměřovány základní charakteristiky senzorů plynů tak, jak jsou popsány v předchozí kapitole. Jsou to: selektivita a citlivost senzoru v závislosti na teplotě aktivní vrstvy, odezva senzoru při změně koncentrace měřeného plynu, rychlost odezvy senzoru.

Schématické uspořádání vodivostního senzoru plynů je zobrazeno na Obr. 3.1, kde R_h [Ω] je odpor topného elementu, R_s [Ω] je odpor aktivní vrstvy. Nejběžnější hodnoty parametrů TLV a TNV senzorů potřebných pro návrh měřicí stanice jsou shrnuty v tab. 3.1: (částečně zadáno a převzato z [1], [3]-[5], [7]).



Obr. 3.1: Schématické uspořádání vodivostního senzoru plynů.

	TNV senzor	TLV senzor
Rezistivita aktivní vrstvy	10 Ω až 100 M Ω	10 Ω až 100 M Ω
Odpor topného elementu při pokojové teplotě	500 Ω až 1500 Ω	5 Ω až 15 Ω
Výkonový ztráta na topném elementu	do 100 mW	do 10 W

Tab. 3.1: Nejběžnější hodnoty parametrů TLV a TNV senzorů

Primárně má měřicí stanice zajistit následující:

1. Nastavit libovolnou teplotu senzoru za pomoci topného elementu. Toto bude provedeno přivedením přesného elektrického napětí na topný element, což způsobí tok elektrického proudu přičemž v odporu vznikají ztráty, které jsou z velké části v podobě přeměny el. energie v Joulovo teplo. Pro zjišťování aktuální teploty senzoru bude využito měření změny odporu tohoto topného elementu.
2. Přivést k aktivní vrstvě senzoru předem definovanou směs plynů.
3. Změřit vodivost (rezistivitu) aktivní vrstvy a tím zjistit reakci senzoru na změnu teploty aktivní vrstvy a reakci na změnu koncentrace plynů.

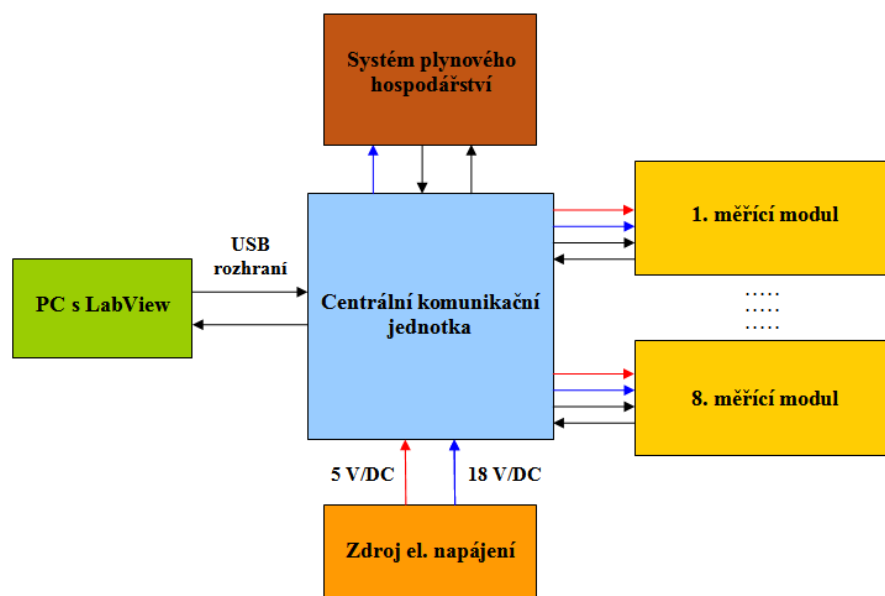
3.2. Volba koncepce pro konstrukci testovací stanice

V první řadě je třeba se zabývat systémem pro přípravu plyné směsi. K řešení tohoto úkolu se běžně používá několika způsobů. Čistě chemický, kdy je přesná koncentrace plynů přichystána za pomoci chemické reakce několika přesně dávkovaných prvků, při níž dochází k vylučování přesných koncentrací plynů do uzavřené nádoby, z níž je pak plyn určitou rychlostí přiváděn k senzoru [5]. Druhou metodou používanou pro měření s chemickými senzory plynů je příprava plyné směsi v plynovém zásobníku, který byl před přivedením různých poměrů plynů dokonale vyčerpán (vakuován). Toto však vyžaduje nákladné zařízení na dokonalé vyčerpání plynového zásobníku [9]. Výhodou těchto dvou uvedených metod je velká přesnost připravené plyné směsi, avšak velkou nevýhodou je malá flexibilita. Proměřit závislost odezvy senzoru na změny koncentrace by znamenalo přípravu mnoha koncentrací, což by bylo časově příliš náročné.

Pro navrhovanou testovací stanici je uvažován průtokový systém s mícháním plynů ze dvou přívodů [3], [4]. Samotné senzory budou umístěny na konci celého průtokového systému v uzavřené průtokové komůrce. Zdrojem analytu pro měření budou bomby se stlačeným plynem. V našem případě to bude čistý dusík se 100 ppm O₂. Jako druhý plyn bude použit čistý dusík. Tento bude mimo jiné sloužit k výplachu průtokového systému před začátkem každého měření a pro nastavení definovaných výchozích podmínek. N₂, CO₂, Ar atd. jsou plyny bez redoxních vlastností a nelze je tudíž těmito vodivostními senzory detekovat – jejich sorpce není spjata s výměnou elektronů, a proto jsou pro výplach nejvhodnější [5]. Celý průtokový systém bude sestávat z pěti solenoidových ventilů, které budou regulovat přívod plynu z bomb a do plynové komůrky. Dva z nich budou sloužit pouze pro prvotní výplach přívodů plynu po bezprostředním připojení ke zdrojům plynů. Další tři budou sloužit k okamžitému pouštění a zastavování průtoku plynu během měření. Dále budou použity dva komerčně dodávané digitální hmotnostní regulátory průtoku plynu, které zajistí pomocí svých elektromagnetických ventilů a přesného měření aktuálního průtoku mixování obou přiváděných plynů v přesných poměrech. Promíchání proudícího plynu podléhá zákonům termodynamiky.

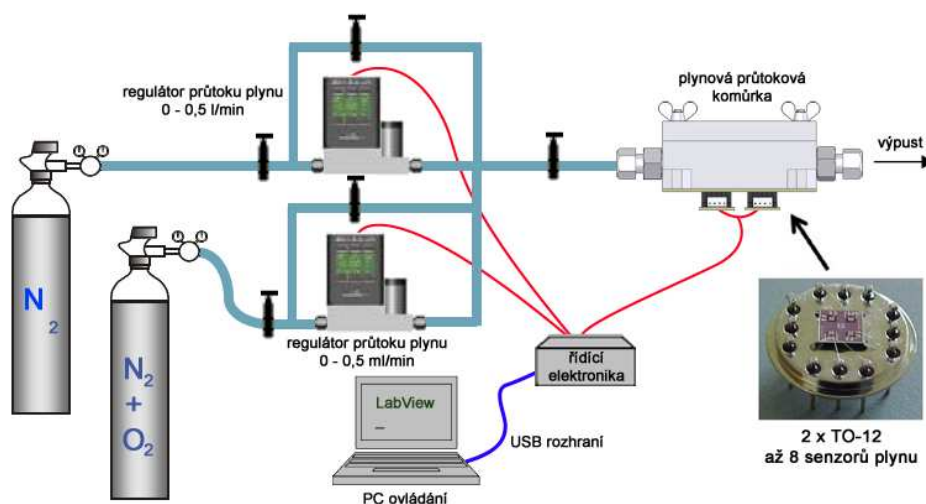
Celá řídicí a měřicí elektronika je koncipována jako virtuální měřicí přístroj. Jedná se o moderní trend v měřicí technice, kdy je měřicí zařízení realizováno ve většině případů pouze jako měřicí modul bez ovládacích a kontrolních prvků a tyto jsou zprostředkovány pomocí nadstavbového softwaru většinou v PC. Oproti klasickému provedení to přináší řadu výhod a to snazší propojování různých přístrojů, jednoduchá modifikace softwaru v rámci komunikačních protokolů a úspora nákladů vynaložených na monitorovací a ovládací prvky. Na světovém poli zaujímá vedoucí postavení v tomto oboru firma National Instruments, USA - Texas [22]. Dodává jak měřicí karty, tak software pro jejich ovládání. Právě programové prostředí LabView od této firmy bylo zvoleno pro komunikaci s celým měřicím systémem. Tento software umožňuje relativně snadné a flexibilní sestavení programového vybavení za pomoci již dvacet let vyvíjeného grafického programovacího jazyku.

Hardware vybavení je konstruováno za pomoci běžně dostupných diskrétních součástek. Je koncipováno jako modulové pro snadnou úpravu dílčích částí v budoucnu. Na Obr. 3.2 je zobrazena základní modulová koncepce celého měřicího systému.



Obr. 3.2: Blokové uspořádání modulové koncepce celé měřicí stanice.

Celý měřicí systém se skládá ze samostatné centrální komunikační jednotky, která zajišťuje komunikační rozhraní mezi osmi na sobě nezávislými měřicími moduly, systémem plynového hospodářství a PC. Systém plynového hospodářství se skládá z jednotlivých solenoidových ventilů a dvou digitálně ovládaných hmotnostních regulátorů průtoku plynů. Celé zařízení je napájeno ze síťového zdroje, který dodává pro zařízení stejnosměrná napětí 5 a 18 V. Pohled na celkové uspořádání stanice je zobrazeno na obrázku Obr. 3.3.



Obr. 3.3: Celkový pohled na sestavu konstruované měřicí stanice.

4. Rozbor řešení jednotlivých modulů stanice

4.1. Systém plynového hospodářství

Pro míchání plyné směsi se jeví jako vhodné digitální hmotnostní regulátory průtoku (flow systémy) od firmy Alicat Scientific, USA a firmy Aalborg, USA. Příklad řady regulátorů od firmy Alicat je na obr. 4.1. Tyto umožňují dostatečně přesnou regulaci obou zdrojů plynu. Výhodou těchto regulátorů je možnost digitálního ovládání po sériové lince RS232. Celé uspořádání plynového hospodářství bude vycházet z obr. 3.3. Při volbě jednotlivých průtoků a velikosti vnitřního objemu plynové komůrky bylo vycházeno z [3] a [4]. Jeden regulátor průtoku bude regulovat průtok plynu od 0 do 0,5 l/min a druhý od 0 do 0,5 ml/min. Tyto zvolené rozsahy umožní namíchat měřený plyn ve velkém rozpětí koncentrací, až v řádech ppb, což bude mimo jiné záležet také na koncentracích plynu v plynových bombách. Objem plynové komůrky by měl být co nejmenší, ale zároveň dostatečně velký pro vkládání a manipulaci s oběma senzory. Dále bude použito pět elektromagnetických ventilů pro rychlé otvírání a uzavírání větví plynového systému. Průtokoměry a ventily budou ovládány přímo z centrální komunikační a řídicí jednotky. Průtokoměry budou ovládány přes rozhraní RS232 a ventily přímým spínáním. Vhodným řešením by bylo doplnit celý průtokový systém na výstupu přesným analyzátozem plynů pro kontrolu namíchané směsi, což by však neúnosně zvýšilo finanční náročnost celého systému.



Obr. 4.1: Flow systémy od firmy Alicat Scientific [10].

Ze všech dostupných regulátorů průtoku plynu byly vybrány právě regulátory od firmy Alicat Scientific produktové řady MC. MC zde značí hmotnostní průtokoměry. Pro výběr těchto průtokoměrů sehrály hlavní roli následující parametry: dostatečná citlivost, dostupnost, cena, ale hlavně možnost digitálního ovládání a měření se snadno dostupným komunikačním protokolem, což u druhé zmiňované firmy zajištěno nebylo. Tyto protokoly jsou nezbytné pro vytvoření rozhraní s těmito regulátory průtoku. Vybrané typy a jejich základní technické parametry jsou uvedeny v Tab. 4.1 [11]. Regulátory jsou přesně kalibrované pro výběr 30 různých plynů, jak je podrobněji uvedeno v [11].

Tab. 4.1: Vybrané typy průtokových systémů a jejich základní technické údaje [11].

<u>Mass Flow Controller - MC 0,5 SCCM (0 – 0,5 ml/min)</u> <u>Mass Flow Controller - MC 500 SCCM (0 – 500 ml/min)</u>	
přesnost	(0,8% nastavený + 0,2% z celého rozsahu)
pracovní rozsah	1% až 100% celkového rozsahu
typická doba odezvy	100 ms
standardní podmínky	25 °C
pracovní teplota	-10 až +50 °C
maximální tlak	1 MPa
vstupní/výstupní digitální signál	objem, hmotnost, tlak, teplota
vstupní/výstupní analogový signál	hmotnostní průtok
napájecí napětí	12 až 30 Vdc (15 -30 Vdc pro 4-20mA výstup)
napájecí proud	0,25 A
čas spuštění	< 1 s

Pro komunikaci s těmito regulátory průtoku plynů je specifikován jednoduchý komunikační protokol pro provádění základních úkonů měření prostřednictvím zasílání příkazu v ASCII kódu. Doporučená rychlost komunikace udávaná výrobcem se pohybuje kolem 19200 baudů. Každá jednotka má přednastavený identifikátor v podobě ASCII znaku velkého písmene A až Z. Tento identifikátor slouží ke směřování jednotlivých požadavků (nastavení průtoku, nastavení parametrů jednotky, měření aktuálního průtoku) v případě použití společné sériové linky pro oba regulátory.

Ukázka základní příkazů pro ovládání regulátoru MC (ASCII kód) [11]:

*@=A - zvolí A jako identifikátor
A - vypíše aktuální hodnoty měření viz datový formát
A\$\$0 - volba měřeného plynu 0 – Air
*W21=220 - nastavení „P“ konstanty prvku PID
*W22=25 - nastavení „D“ konstanty prvku PID

Datový formát přijímaných dat z regulátoru MC (ASCII kód) [11]:

Př. : +014. 70 +025. 00 +02. 004 +02. 004 +2. 004 Air

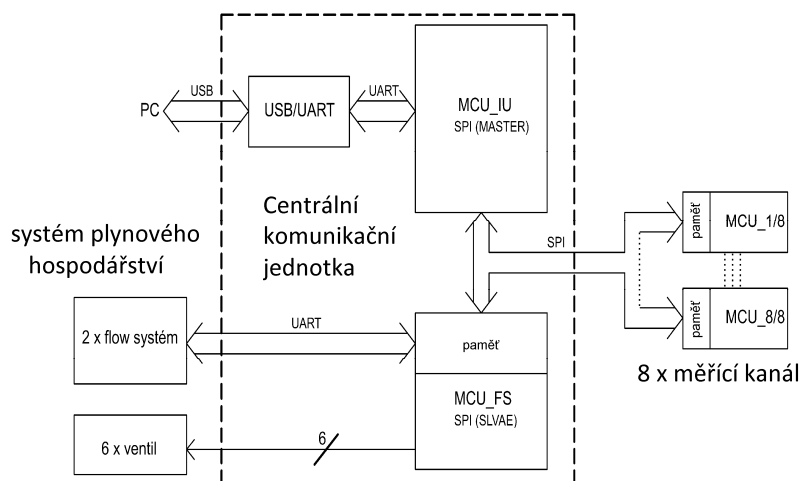
1. sloupec - tlak [PSIA]
2. sloupec - teplota [° C]
3. sloupec - objemový průtok [dle zvolené jednotky]
4. sloupec - hmotnostní průtok [dle zvolené jednotky]
5. sloupec - požadovaná hodnota [dle zvolené jednotky]
6. sloupec - přednastavený měřený plyn

Pro předejití poškození drahého regulačního systému je zde vhodné upozornit na porušení záručních podmínek pro následující případy [11]. Maximální dovolený tlak je 1 MPa. Do průtokoměrů nesmí být vpuštěn agresivní plyn jako je Amonik, HCL, SO₂, H₂S, NO₂, NO atd. Elektronika přístroje nesmí být vystavena kapalinám. Nesmí být vpouštěny

plyny, u kterých by mohlo docházet ke kondenzaci vodních par a tak k poškození snímačů tlaku. Dále by měl být zařazen filtr pro zachycení částecek o velikostech 20 až 50 μm . Všechny tyto požadavky je nutno dodržet pro zachování správné funkce použitých regulátorů.

4.2. Centrální komunikační jednotka

Hlavním úkolem centrální komunikační jednotky je řízení toku dat mezi jednotlivými moduly a PC. Dále obsahuje samostatný modul pro řízení systému plynového hospodářství. Deska plošného spoje (DPS) centrální jednotky zajišťuje rozvod napájení z připojeného síťového zdroje do ostatních modulů. Blokově je řešení centrální komunikační jednotky znázorněno na obr. 4.2.



Obr. 4.2.: Blokové schéma centrální komunikační jednotky a připojených periferií.

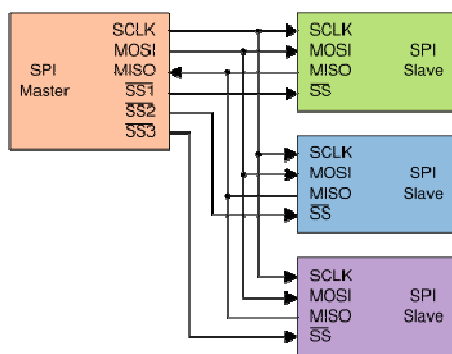
Modulární koncepce je pojata tak, že každý modul obsahuje jeden mikrokontrolér (MCU), který zajišťuje jeho funkci a který slouží k jeho ovládání. Každý modul tedy může pracovat nezávisle na ostatních, přičemž jeho aktuální stav je uložen v jeho paměti. Jak je vidět na obr. 4.2, centrální komunikační jednotka obsahuje dva mikrokontroléry. MCU_FS ovládající systém plynového hospodářství, který je umístěn jako součást centrální komunikační jednotky, přičemž jeho charakter je stejný jako u měřicích modulů. Pro tuto část systému nejsou žádné důvody, proč by měla být v budoucnu měněna, a proto nebrání nic její integraci na jednu desku plošného spoje. MCU_IU řídí tok dat mezi jednotlivými moduly a PC. Téměř každý počítač je dnes vybaven rozhraním USB, a proto bylo vybráno jako komunikační linka mezi PC a měřicí stanicí. Pro snadnou a levnou implementaci USB rozhraní k MCU byl vybrán dobře známý převodník USB/UART od firmy FTDI (Future Technology Devices International Limited, UK) – FT232R. Na stránkách výrobce jsou umístěny i dobře zdokumentované příklady aplikací převodníku pro různá softwarová prostředí i s příslušnými ovladači a knihovnami. Výhodou této součástky oproti jiným je minimum externích součástek. Aplikace není tedy nějak náročná. Umožňuje komunikovat s MCU rychlostí až 3 Mbaudy [12]. Bylo by sice možné realizovat celou centrální komunikační jednotku a řízení plynového hospodářství pouze v jednom MCU s USB rozhraním, ale z cenového důvodu byla zvolena tato levnější varianta. Navíc by bylo obtížnější implementovat software MCU, který by zajišťoval rychlou komunikaci mezi tolika moduly a relativně pomalou komunikací s regulátory průtoku. Právě kvůli rozdílným

rychlostem jsou použity vyrovnávací paměti pro všechny moduly. Jak je dále vidět, komunikace mezi regulátory průtoku plynů probíhá čistě po asynchronní sériové lince tak, jak je to zmíněno v přecházející kapitole. Zde je pouze zapotřebí zajistit převod úrovní signálu z TTL MCU na RS232 regulátorů.

Pro komunikaci mezi jednotlivými MCU je zde SPI rozhraní. SPI (Serial Peripheral Interface) je jednoduchá sériová sběrnice vyvinutá firmou Motorola. Typicky je používána pro připojení periferních obvodů nebo podřízených mikroprocesorů v režimu Slave k nadřízenému mikroprocesoru v režimu Master. Sběrnice je tvořena trojicí signálů a případně dalším signálem pro výběr obvodu:

- MOSI (Master Out / Slave In) – master vysílá, slave přijímá,
- MISO (Master In / Slave Out) – master přijímá, slave vysílá,
- SCK (Serial Clock) – společný hodinový signál,
- SS (Slave Select) – výběr obvodu.

Předání dat je jednoduché, operace nad SPI zaměnění údaje v datových registrech řadiče a podřízeného obvodu. Přesun je řízen hodinami hlavního mikrokontroléru, tedy MCU_IU, který nastaví rychlost přenosu. Aby bylo možné připojit obvody, které mají rozdílné polarity hodinového a datového signálu, lze jejich polaritu měnit – to už závisí na použitém mikropočítači pro měřicí signál. Schématicky je SPI komunikace znázorněna na obr. 4.3.



Obr. 4.3: Znázornění zapojení SPI komunikace pro jednu master a tři slave jednotky.

Jako nejvhodnější se pro komunikaci mezi jednotlivými moduly a PC jeví použití příkazů v ASCII kódu. Tato volba usnadní pozdější vytváření softwarového vybavení. Přehled základních příkazů pro ovládání systému je v příloze 1.

Konstrukce příkazu poslaného z PC pro libovolný modul je následující:

>0xxxxx;

- >** – ASCII znak oznamující komunikačnímu MCU začátek nové komunikace
- 0** – může nabývat ASCII hodnot 0 až 9, podle toho, pro který kanál je příkaz určen (0 - centrální komunikační jednotka, 1 až 8 – měřicí kanály, 9 - systém plynového hospodářství)
- xxxxx** - libovolně dlouhý příkaz dle cílového modulu
- ;** – oznamuje konec komunikace

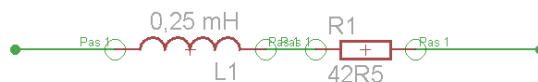
Znaky „>“ a „;“ jsou tzv. rezervované znaky a nemohou být použity v případě vylepšování měřicích kanálů pro tvorbu nových příkazů. Jinak je toto řešení dostatečně univerzální pro vytváření nových libovolných příkazů. Do koncového modul dorazí vždy jen část příkazu xxxxxx. V případě, že jsou zpět odesílány bitově samé nuly nebo jedničky, do PC se nic nepřenáší.

Pro konstrukci centrální komunikační jednotky není volba HW a použitých MCU příliš kritická. Postačí jakýkoliv MCU s dostatečným počtem vstupních a výstupních bran. Výhodou může být HW implementace UART a SPI přímo v MCU, tak aby nebylo nutné tuto komunikaci vytvářet v programu MCU. Dát pozor je nutné pouze při výběru MCU pro komunikaci s regulátory průtoku plynů, kde je potřebný dostatek paměti na bufferování výstupních a vstupních dat regulátorů.

4.3. Požadavky na zdroj napájení

Síťový zdroj má napájet všechny připojené moduly a soustavu plynového hospodářství. Celé zařízení je navrhováno pro stejnosměrné napájení. V případě měřicích modulů je třeba napájet operační zesilovače se symetrickým napájením ± 18 V. Kladné napětí + 18 V bude také zdrojem pro proudový zdroj topného elementu. Tento je navrhován pro maximální odběr 1 A. Jelikož je do pouzdra TO-12 možno umístit najednou pouze jeden TLV senzor, je tedy zbytečné počítat se zátěží 8 x 1 A. Zařízení bude konstruováno s možností dvou výkonových měřicích kanálů pro TLV s možností měření i TNV senzorů a zbylých šest kanálů bude pouze pro senzory TNV, které nejsou tak energeticky náročné. Toto řešení navíc ušetří prostor v přístrojové krabici, jelikož výkonové měřicí kanály jsou mnohem rozměrnější než nízkovýkonové. Je tedy počítáno s odběrem 2,5 A na měřicí moduly z 18 V zdroje. Digitální regulátory průtoku pracují od 12 V do 35 V s odběrem do 250 mA. Vybrané solenoidové ventily jsou určeny na stejnosměrné napětí 24 V při odběru proudu 0,66 A. Pro současné otevření všech ventilů to v sumě znamená odběr přibližně 4 A. Nevýhodou napětí 24 V je také to, že se tělo ventilu během sepnutí příliš zahřívá. Na základě měření a ze získání parametrů cívky ventilu (viz obr. 4.4) však bylo zjištěno, že solenoidové ventily se bezpečně otvírají již při 15 V s odběrem 0,35 A. To znamená téměř poloviční úsporu energie. Celkem je tedy s rezervou počítáno pro solenoidové ventily s odběrem proudu 2,5 A. Napětí z 18 V na 15 V je upraveno za pomoci nízkoztrátového DC-DC měniče LM2576TADJ. Pro digitální a měřicí obvody je počítáno s napájením +5 V. Jelikož je proudový odběr těchto součástek malý, je zdroj dimenzovaný na odběr do 1 A. Zato jsou na zdroj kladeny požadavky z hlediska nízkého zvlnění, nízkého šumu a nízkého elektromagnetického rušení (EMI). Proto byl pro napájení zvolen nespínaný zdroj s toroidním transformátorem 230 V na primární cívce a s transformací 20 V / 7 A a 9 V / 1 A na sekundárních cívkách. Požadavky na zdroj s určitou rezervou jsou shrnuty v

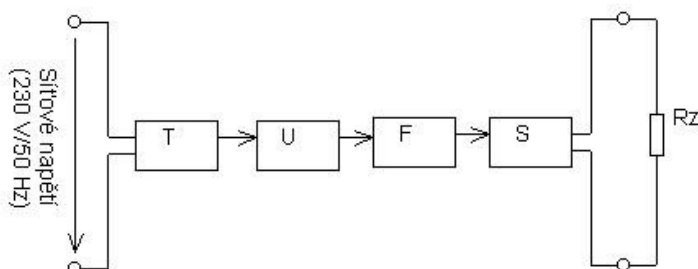
tab. 4.2.



Obr. 4.4: Změřené parametry použitých solenoidových ventilů – ventil typ D298, cívka série 7200.

Tab. 4.2: Souhrn požadavků na napájecí zdroj

Vstupní napětí	230 V / 50 Hz (počítáno s tolerancí $\pm 10\%$)
1. výstupní napětí	+5 V / 1 A
2. výstupní napětí	+18 V / 6 A
3. výstupní napětí	-18 V / 500 mA

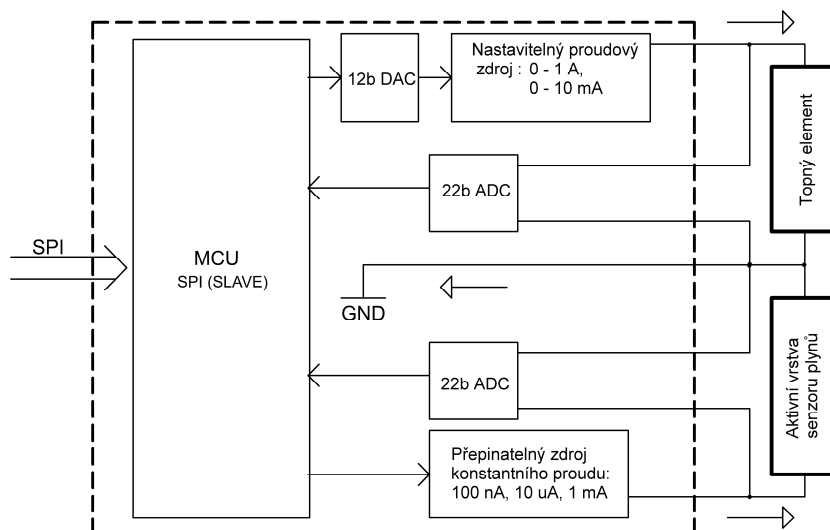


Obr. 4.5: Zjednodušené blokové schéma navrhovaného napájecího zdroje.

Zjednodušené blokové schéma zapojení zdroje je na obr. 4.5, kde je T - transformátor, U - usměrňovač, F – filtr, S – stabilizátor. Při návrhu zdroje bylo čerpáno z literatury [13] a [14].

4.4. Hardware pro měření základních charakteristik vodivostního senzoru plynů

Každý modul je řešen samostatně pro měření na jednom senzoru. Úkolem modulu je řízení a regulace teploty senzoru prostřednictvím topného elementu a měření rezistivity (vodivosti) aktivní vrstvy senzoru plynů. Blokově je měřicí modul znázorněn na obr. 4.6. Pro měření rezistivity aktivní vrstvy i topného elementu byla zvolena jako nejvhodnější čtyřvodičová metoda. Její výhoda je především v tom, že se neuplatňuje odpor propojovacích vodičů mezi stanicí a senzorem. Také je tato metoda vhodná pro svoji jednodušší implementaci. Pro topný element je zde uvažován digitálně říditelný proudový zdroj, který je schopný dodat dva rozsahy proudů (0 – 10 mA a 0 – 1 A). Rozsah do 10 mA je vhodný pro měření na TNV senzorech a rozsah do 1 A na TLV senzorech plynů. Pro dosažení dostatečně jemné regulace proudu tak, aby bylo možné nastavovat dostatečně přesně teplotu je uvažován 12 bitový DA převodník. Druhý proudový zdroj slouží k nastavení potřebného proudu pro měření rezistivity aktivní vrstvy. Umožňuje přepínání tří konstantních proudů, které jsou vhodně zvoleny pro měření odporu od 10 Ω do 100 M Ω s dostatečně velkým úbytkem napětí, aby nedocházelo k ovlivnění měřeného signálu šumem. Pro přesné měření napětí vzniklého průchodem nastavených proudů na topném elementu a na aktivní vrstvě je uvažován 22 bitový AD převodník.



Obr. 4.6: Blokové schéma uspořádání měřicího modulu.

4.4.1. Problematika regulace teploty topného elementu

Prvním úkolem tohoto modulu je ovládání topného elementu tak, aby byla zaručena teplota senzoru s tolerancí alespoň $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Jak je zmiňováno výše, k určování aktuální teploty se využívá měření změny odporu topného elementu. Jedná se o teplotní závislost odporu, kterou pro malé teploty lze linearizovat a je dána známým vztahem:

$$R = R_0(1 + A(T - T_0)) \text{ } [\Omega] \quad (4.1)$$

kde $R \text{ } [\Omega]$ je odpor při teplotě $T \text{ } [\text{K}]$, $R_0 \text{ } [\Omega]$ je známý odpor při teplotě $T_0 \text{ } [\text{K}]$, $A \text{ } [\text{K}^{-1}]$ je teplotní součinitel odporu. Tento zjednodušený vztah však nelze pro účely určování teploty topného elementu senzoru plynů použít. Je třeba použít složitějších vztahů, s určitou aproximací teplotní závislosti odporu pro celý měřený rozsah např. (0 až $600\text{ }^{\circ}\text{C}$) [15], [16]. Tento vztah je však pro každý materiál jiný a nelze je zde tedy uvádět v plném rozsahu. Jako příklad je možné uvést vztah pro výpočet teplotní závislosti odporu platinového senzoru teploty, který je brán jako modelový příklad [15]:

$$R = R_0(1 + A(T - T_0) + B(T - T_0)^2 - C(T - T_0)^3(T - T_0 - R_0)) \quad (4.2)$$

kde $R \text{ } [\Omega]$ je odpor Pt rezistoru při teplotě $T \text{ } [\text{K}]$, $R_0 \text{ } [\Omega]$ je známý odpor při teplotě $T_0 \text{ } [\Omega]$, $A \text{ } [\text{K}^{-1}]$, $B \text{ } [\text{K}^{-2}]$, $C \text{ } [-]$ jsou teplotní součinitelé odporu. Jejich hodnoty jsou uvedeny v tab. 4.3 [15]. Pro teploty větší než T_0 je teplotní součinitel odporu $C = 0$.

	Teplotní součinitel odporu
A	$3,90802 \cdot 10^{-3} \text{ } [\text{K}^{-1}]$
B	$-5,802 \cdot 10^{-7} \text{ } [\text{K}^{-2}]$
C	$-4,27350 \cdot 10 \text{ } [-]$

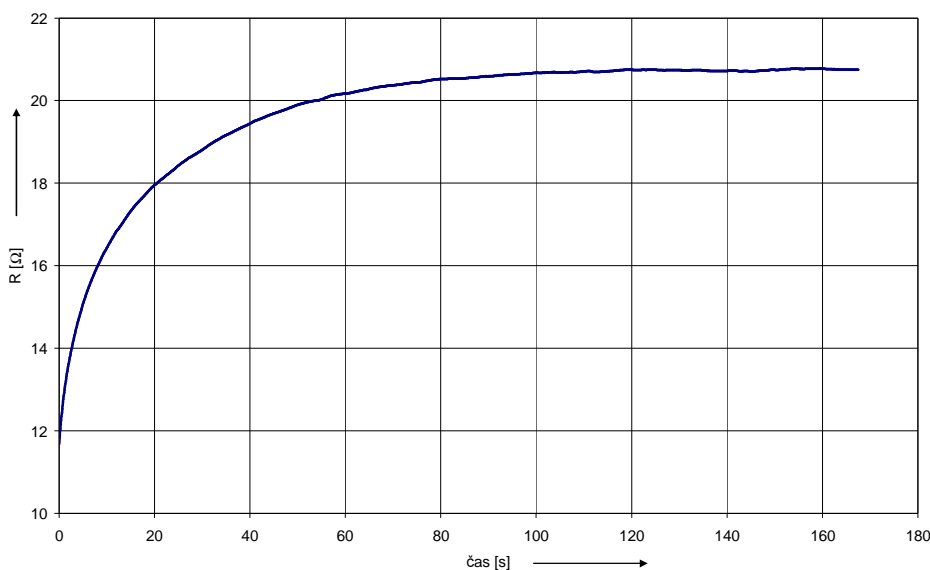
Tab. 4.3: Teplotní součinitelé odporu pro Pt termistor dle IEC normy.
Platí pro $R_0 = 100\text{ } \Omega$ a $T_0 = 273,15\text{ K} = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ [15].

Známe-li odpor Pt topného elementu při pokojové teplotě, můžeme dle rovnice (4.2) snadno vypočítat, jaký odpor bude mít topný element při dosažení požadované teploty. Úkolem MCU měřicího kanálu je nastavit takový proud topným elementem, který způsobí takové jeho zahřátí, aby se jeho odpor změnil na tuto vypočítanou hodnotu. Při dosažení

požadovaného odporu bude na senzoru i požadovaná teplota. Protože není příliš reálné, aby MCU zvládal všechny druhy aproximačních křivek, je vztah mezi teplotou a odporem ošetřen softwarově v PC. Do MCU přijde jen požadavek na odpor, kterého má být dosaženo.

Pro regulaci u tlustovrstvých senzorů bude použit PSD regulátor (Proportional – Summation – Differentiation) [18]-[20], který představuje diskrétní verzi PID regulátoru. Časová konstanta byla určena z průběhu změny odporu topného elementu TLV senzoru při skokové změně proudu z 0 na 250 mA (viz obr. 4.7) jako 0,632 z rozdílu mezi ustálenou a počáteční hodnotou. Časová hodnota soustavy je asi 14,1 s.

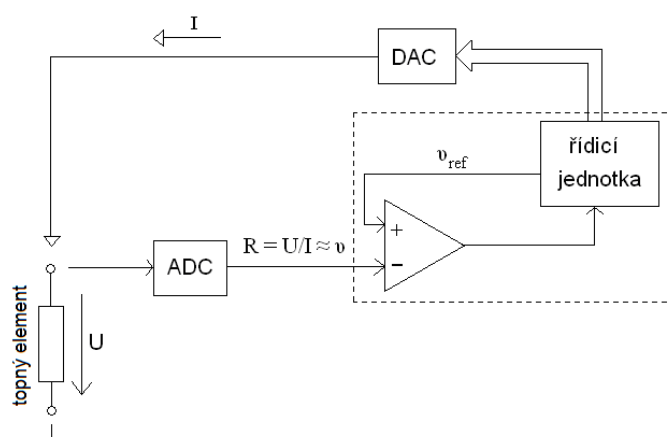
U řídicího regulátoru musí být splněn vzorkovací teorém. Perioda vzorkování musí být dostatečně krátká vzhledem k dynamice systému. Použitý AD převodník umožňuje vzorkování s rychlostí 13,75 SPS. Vzhledem k tomu, že soustava s TLV senzorem má časovou konstantu asi 14,1 s, je tato vzorkovací frekvence dostatečná. Obecně by vyšší vzorkovací frekvence umožnila realizaci řady dalších pokročilých variant řídicích algoritmů. Spojitým filtrem také musejí být dostatečně potlačeny všechny rušivé signály o frekvenci vyšší, než je odpovídající frekvence vzorkování. Odezva PSD s relativně delší periodou vzorkování při změně žádané hodnoty bude pomalejší a kmitavější, než při použití PID regulátoru.



Obr. 4.7: Změřený průběh rezistivity topného elementu TLV senzoru pro skokovou změnu proudu z 0 na 250 mA. Rezistivita elementu při pokojové teplotě je 10,4 Ω .

U tenkovrstvých senzorů se jejich rezistivita s proudem mění téměř okamžitě, díky tomu, že mají minimální tepelnou kapacitu (udávaná hodnota ustavení je řádově v ms nebo dokonce v μs) [3], [4]. Pro tuto soustavu je třeba upravit konstanty PSD regulátoru. Díky rychlé odezvě senzoru na změnu proudu lze použít principu kompenzace, kdy při změně požadavku pomocí velkého kroku proud rychle dosáhneme žádané hodnoty a poté kompenzujeme případné odchylky malými kroky. Je porovnáván odpor nastavený s požadovaným. V případě, že teplota bude nižší než požadovaná, bude proud zvýšen a naopak. Zde je třeba rozlišovat, zda odpor s teplotou roste nebo klesá a zda je teplotní součinitel odporu kladný nebo záporný. U používaných senzorů plynů jsou možné obě

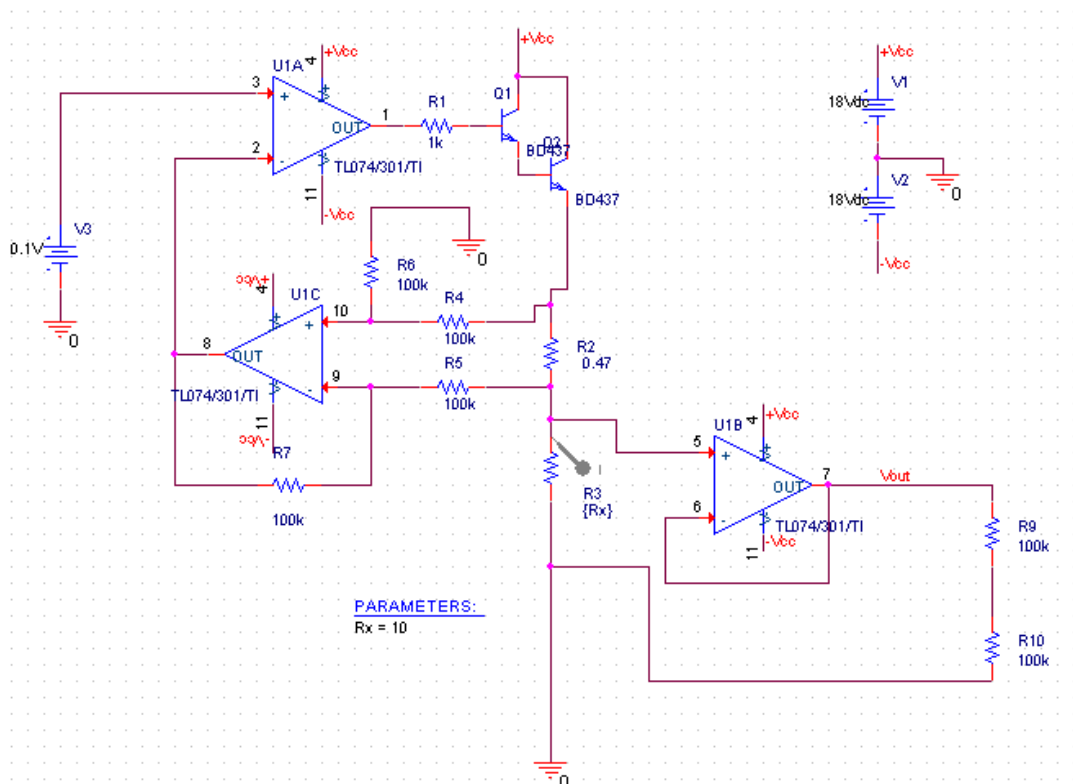
varianty. Toto je ošetřeno nastavením stavového registru v MCU který rozhoduje, zda-li se má přidávat nebo ubírat. Schématicky je tato situace znázorněna na obr. 4.8. Je zde ještě důležité zmínit nutnost vybrat takový MCU, který bude podporovat dostatečně sofistikované funkce a bude mít dostatečně velkou kapacitu paměti, aby bez problému splnil požadavky na složitější matematické operace. Jako vhodný byl vybrán 16 bitový PIC24F16KA1 od firmy Microchip, USA. Tento MCU dovoluje využít daleko více funkcí z programovacího jazyka C++ v ANSI verzi. Dovoluje například snadnější operace s čísli integer, umožňuje dělení, násobení a mnoho další rozšířených funkcí na rozdíl třeba od osmi bitové řady PIC16.



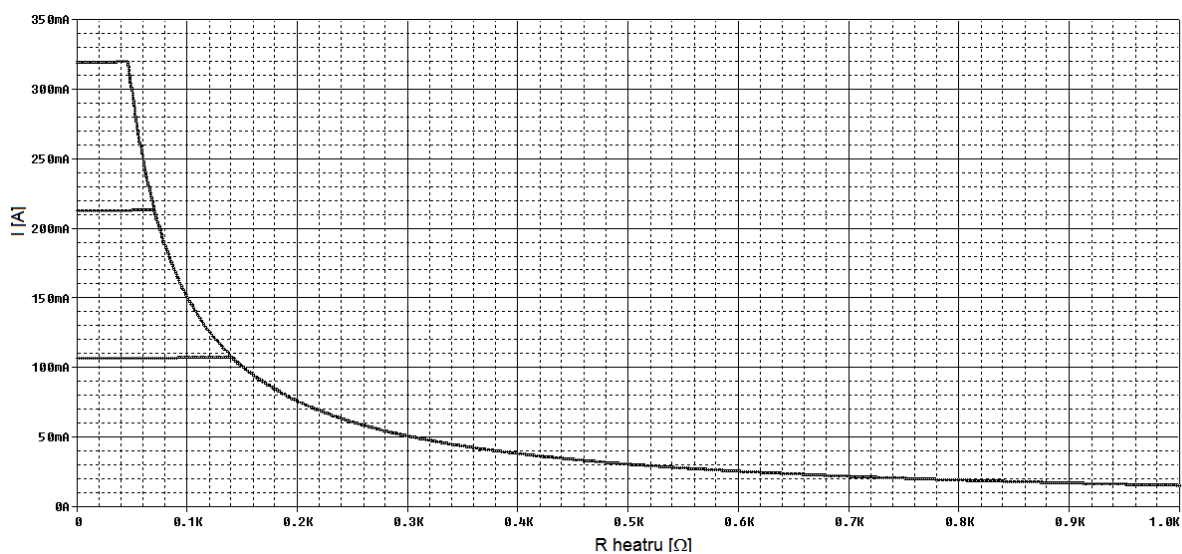
Obr. 4.8. Schématické znázornění porovnávání a nastavování teploty topného elementu.

4.4.2. Řiditelný zdroj proudu pro topný element

Ze všech zkoumaných obvodových řešení zdrojů konstantního proudu bylo nakonec vybráno zapojení zobrazené na obr. 4.9. Bylo navrženo optimalizací dílčích celků: diferenčního zesilovače, komparátoru, a napětěvého sledovače. Veškeré simulace obvodů byly prováděny v programu OrCAD 16.3 od firmy Cadence, USA.

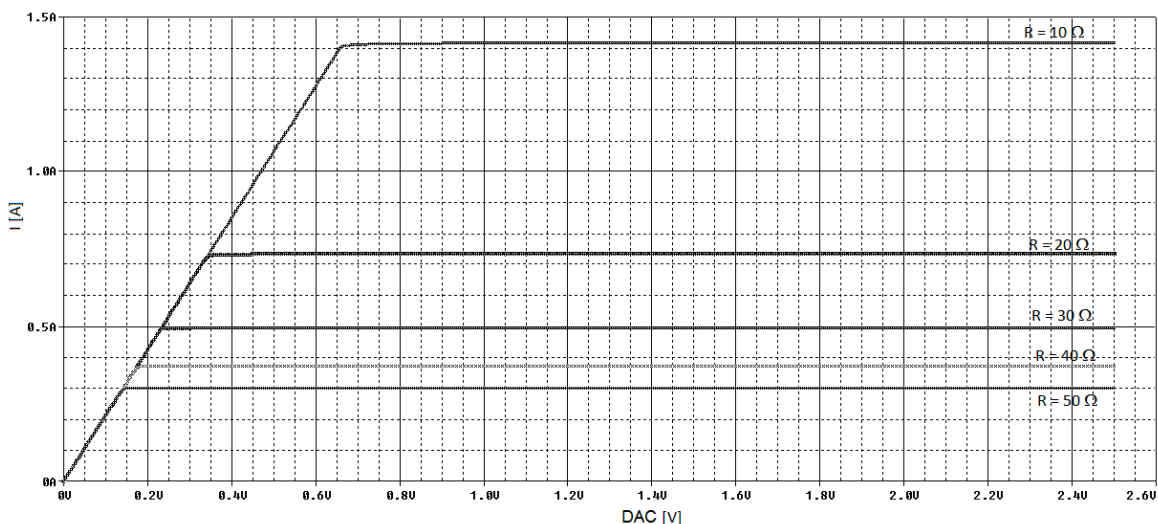


Obr. 4.9. Zjednodušené schéma zapojení říditelného proudového zdroje určeného pro topný element.



Obr. 4.10. Simulace schopnosti říditelného proudového zdroje (dle obr. 4.9) dodávat konstantní proud pro různě

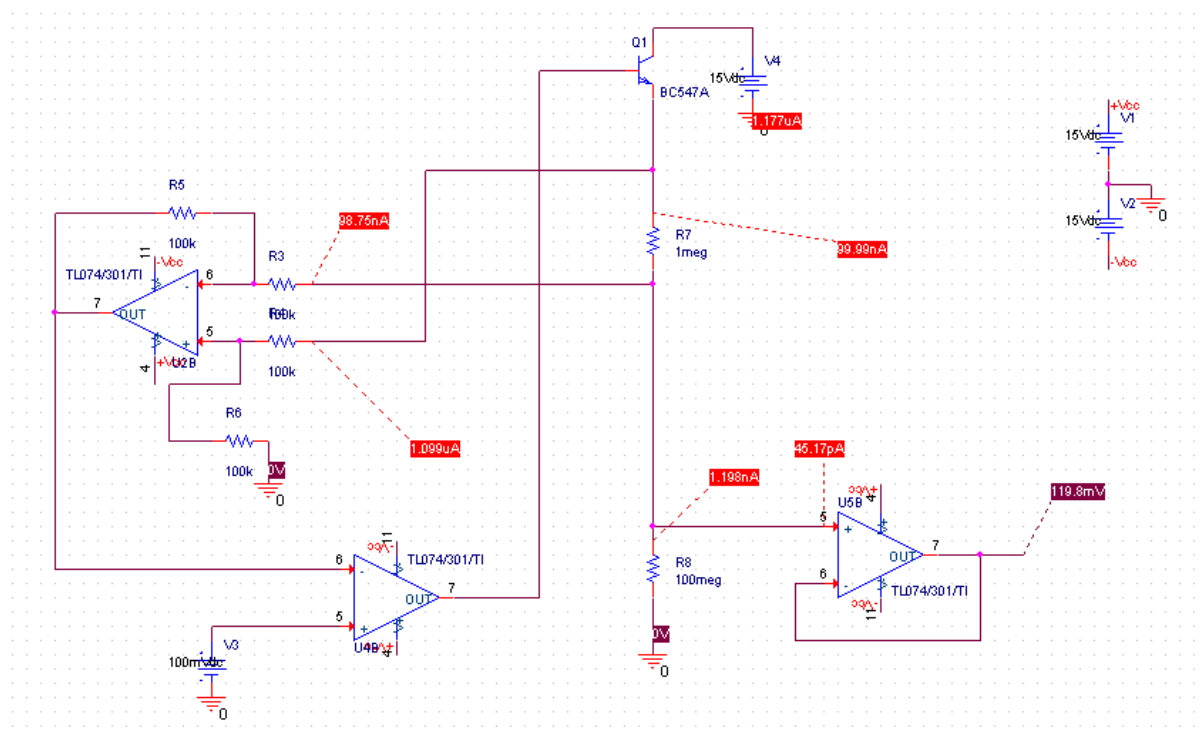
Na obr. 4.10 je vidět, že se vzrůstající požadavkem na hodnotou proudu dodávaného ze zdroje klesá maximální dovolené zátěž tohoto zdroje. Po překročení určité meze, přestane proudový zdroj dodávat konstantní proud a hodnota dodávaného proudu začne prudce klesat. Obr. 4.11 ukazuje totéž s tím rozdílem, že je zde zobrazena schopnost zvyšování dodávaného proudu pro 5 různě velkých zátěží, pro celý rozsah proudového zdroje.



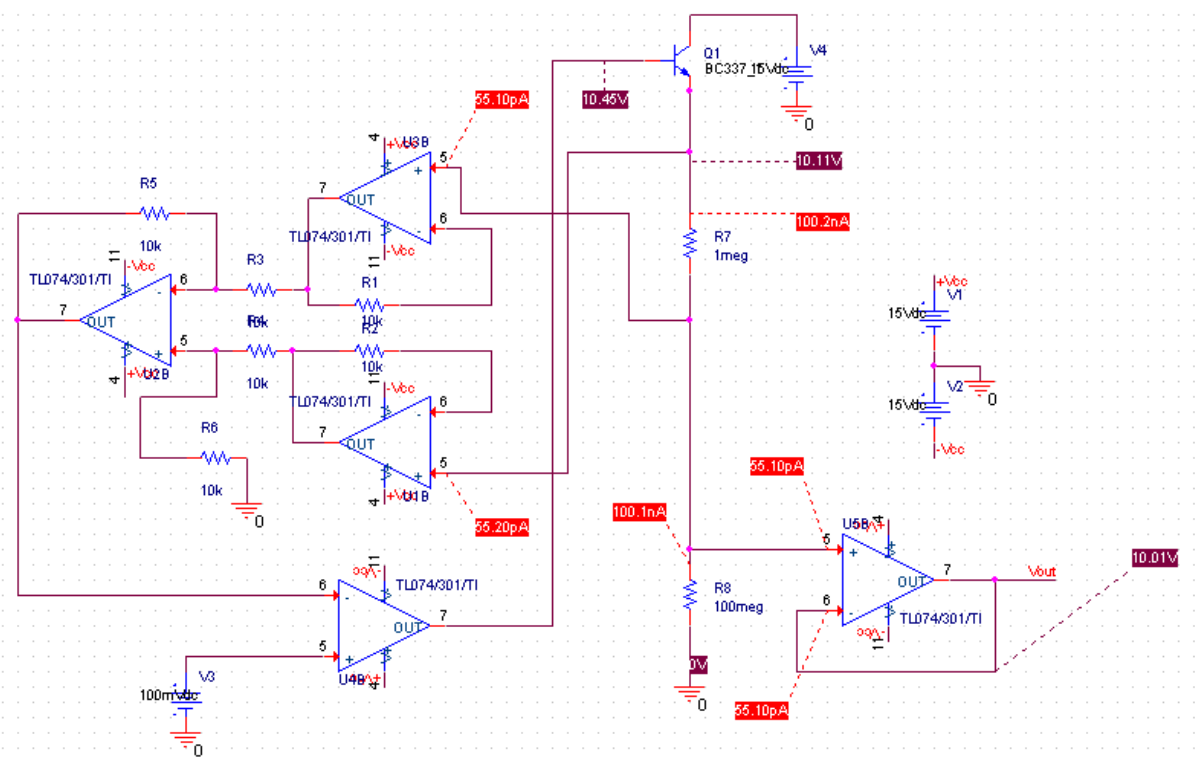
Obr. 4.11. Simulace schopnosti říditelného proudového zdroje (dle obr. 4.9) nastavovat proud pro různě velké zátěže.

4.4.3. Problematika měření rezistivity aktivní vrstvy senzoru plynů

Při návrhu měřicího kanálu pro velké odpory aktivní vrstvy, kdy je měření prováděno za pomoci proudu v řádech nA, je třeba dbát na ošetření sebemenších svodů proudu, které výrazně ovlivňují výsledek a přesnost měření. Na obr. 4.12 a obr. 4.13 jsou zjednodušené zapojení zdrojů konstantního proudu 100 nA. Obě zapojení jsou totožná, pouze s tím rozdílem, že na obr. 4.12 je použit ke zpětné vazbě diferenční zesilovač, zatím co na obr. 4.13 je použit přístrojový zesilovač. Pro měřicí proud 100 nA a měřený odpor 100 MΩ by mělo být na výstupu napěťového sledovače v ideální případě přesně 10 V. Rozdíl mezi zdrojem s diferenčním a přístrojovým zesilovačem je značný. V případě diferenčního zesilovače se nám projevuje nízký vstupní odpor, což má za následek velký svodový proud a velkou chybu měřeného napětí. Výsledek je prakticky nepoužitelný. Zvyšováním vstupního odporu u tohoto zesilovače za pomoci větších odporů na jeho vstupech se moc nepomůžeme, protože porostou i šумы operačního zesilovače. Naproti tomu u zapojení s přístrojovým zesilovačem je při měření hodnoty 100 MΩ dle simulace dosaženo přesnosti $\pm 0,1 \%$. Ve všech zapojeních je použito stejných OZ s vysokou vstupní impedancí která je pro reálnou konstrukci klíčová. Jako diskretní součástky dosahují největší vstupní impedance OZ s MOS tranzistory na vstupu.



Obr. 4.12. Zdroj konstantního proudu s diferenčním zesilovačem pro měření odporů aktivní vrstvy v řádech $M\Omega$. Simulace stejnosměrného bodu a odečtení svodových proudů.

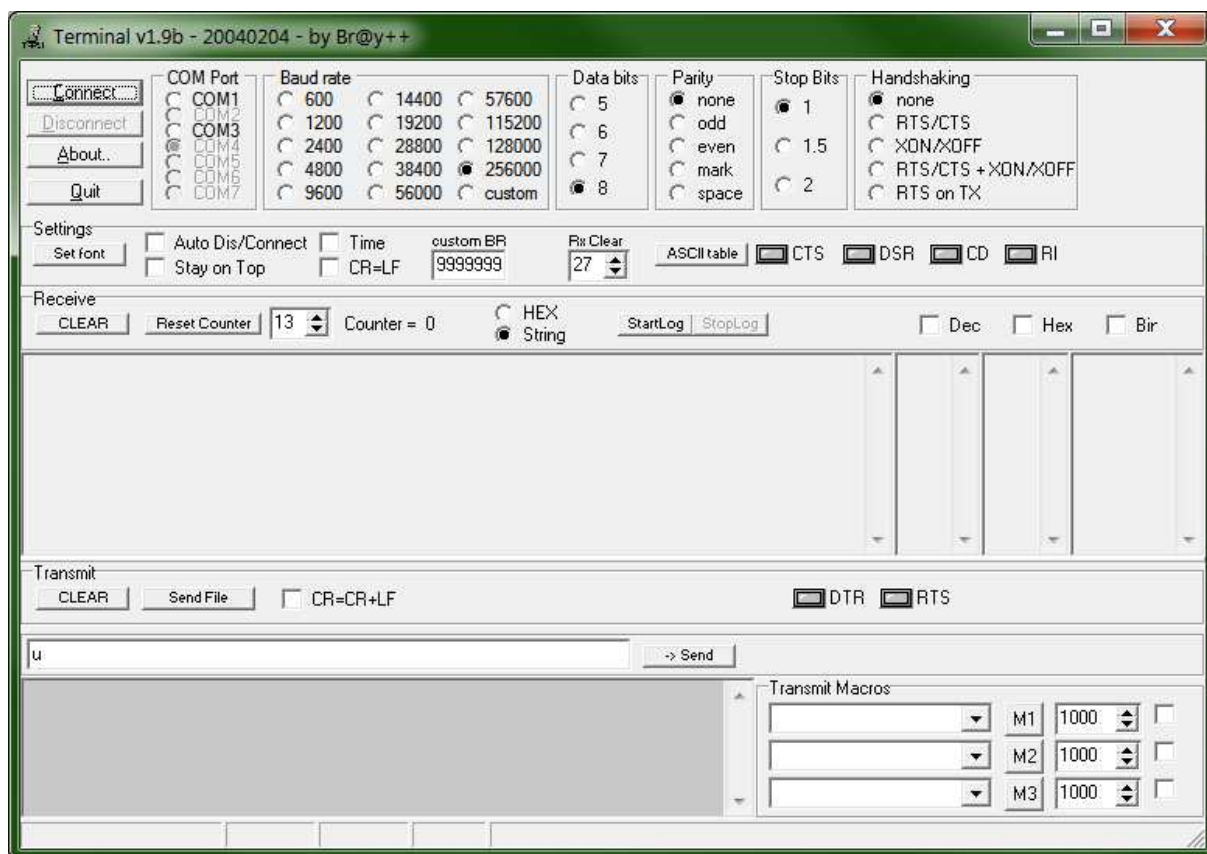


Obr. 4.13. Zdroj konstantního proudu s diferenčním zesilovačem pro měření odporů aktivní vrstvy v řádech $M\Omega$. Simulace stejnosměrného bodu a odečtení svodových proudů.

4.5. Softwarové vybavení – vývojové prostředí LabView 8.0

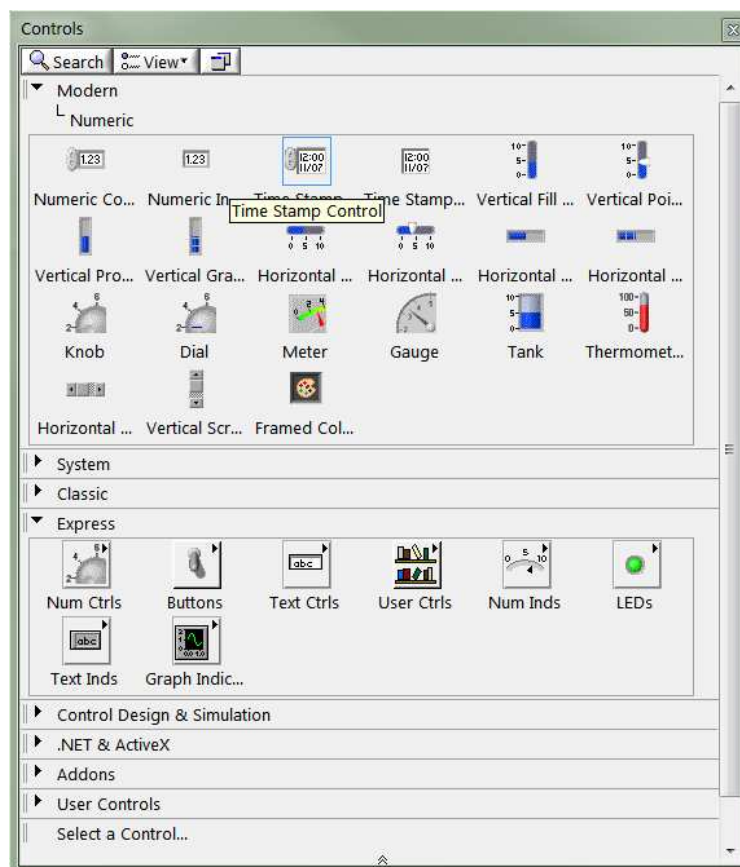
Díky navržené komunikaci za pomoci příkazů v ASCII kódu není problém vytvořit programové vybavení pro měřicí stanici v celé řadě vývojových prostředí. Pro ověření

komunikace se stanicí postačí i prostý terminál pro COM port, přes který budeme odesílat ovládací povely. Ukázka takového terminálu je na obr. 4.14.



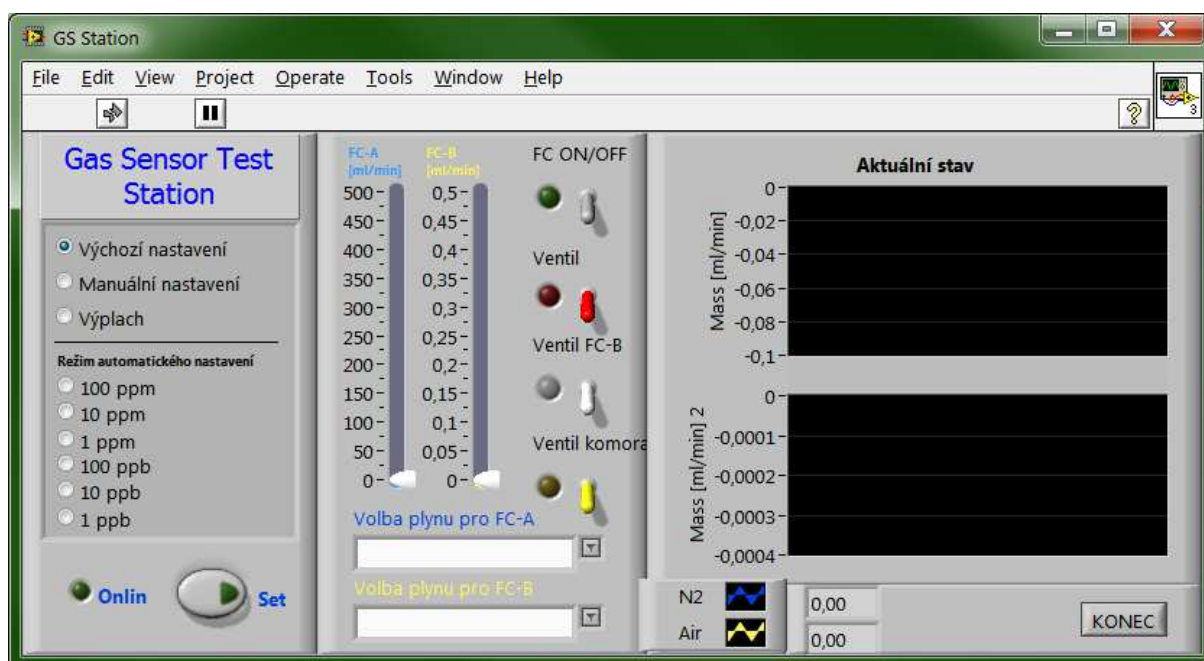
Obr. 4.14: Ukázka jednoduchého ovládacího terminálu pro COM port (dostupný na <http://www.hw.cz>).

Vývojové prostředí od firmy National Instrument pracující s grafickým programovacím jazykem G je v podstatě prostředník, který vytvoří odesílací stroj s příjemnějším uživatelským prostředím. Příchozí data jsou parsována a reprezentována v grafické podobě. U tohoto software se nejedná se o klasický psaný kód, ale o kód v podobě blokového schématu. Zpracování programu zde probíhá na základě toku dat (namísto vykonávání instrukcí). Program = Virtuální měřicí přístroj (Virtual Instrument – VI). Program se skládá z Předního Panelu – uživatelského rozhraní VI. Zde jsou umístěny indikátory, ovládací prvky, pole pro vstupy a výstupy, grafy atd. Tyto prvky jsou většinou reprezentovány prvky z reálného světa jakou jsou různá tlačítka, knoflíky, LED, obrazovky atd., ukázka na obr. 4.15.



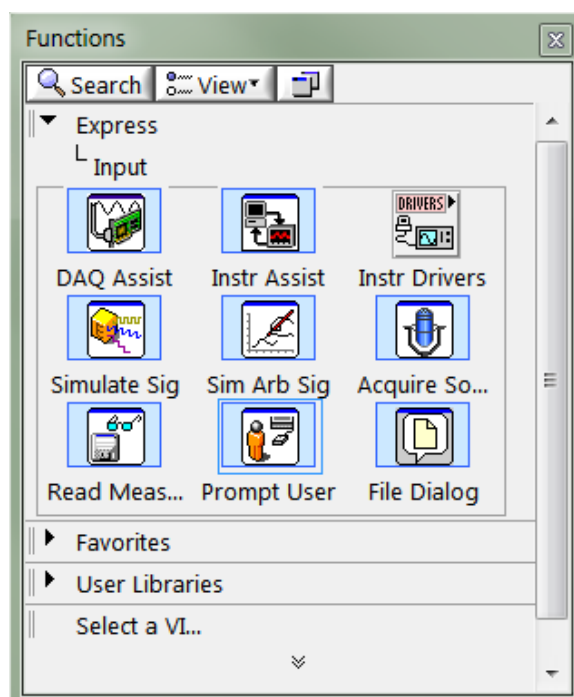
Obr. 4.15: Ukázka palety s výběrem různých ovládacích prvků pro reprezentaci číselných hodnot na předním panelu.

Ukázka předního panelu vytvořeného měřicí přístroj pro ovládání průtokového systému je na obr. 4.16.

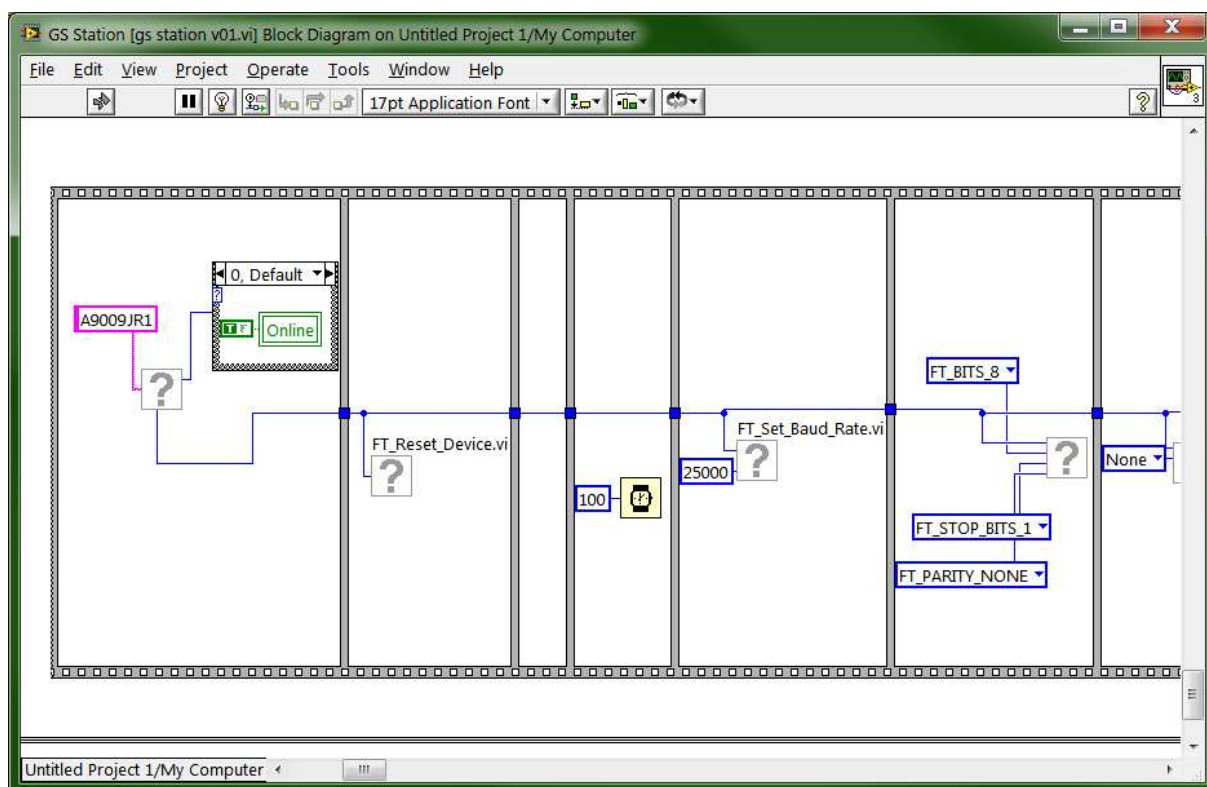


Obr. 4.16: Ukázka předního panelu virtuálního přístroje vytvořeného v LabView pro řízení systému plynového hospodářství.

Po vytvoření předního panelu je namístě sestavování grafického zdrojového kódu programu. Propojení terminálů objektů z předního panelu pomocí vodičů. Provádění nejrůznějších operací s daty pomocí VI funkcí a operátorů, ukázka palety funkcí na obr. 4.17. Ukázka kódu programu pro komunikaci přes virtuální COM port v PC na obr. 4.18.



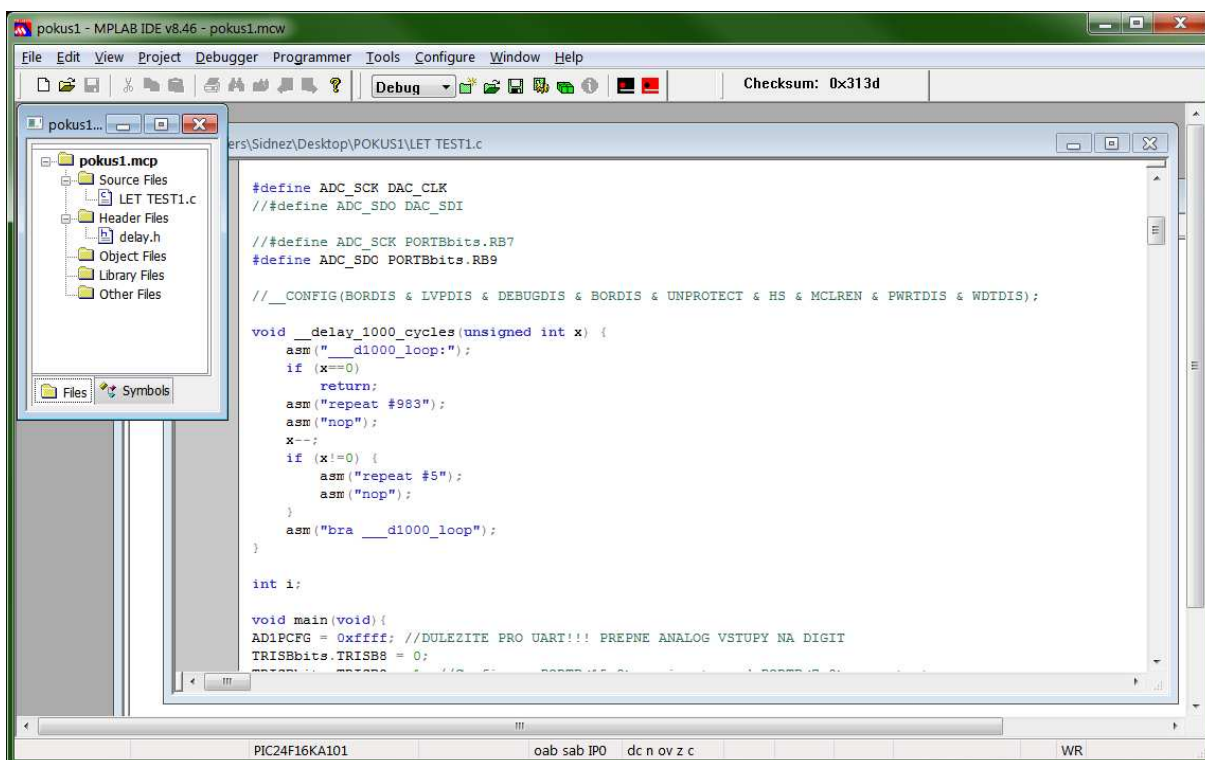
Obr. 4.17: Ukázka palety s výběrem různých ovládacích prvků pro reprezentaci číselných hodnot na předním panelu.



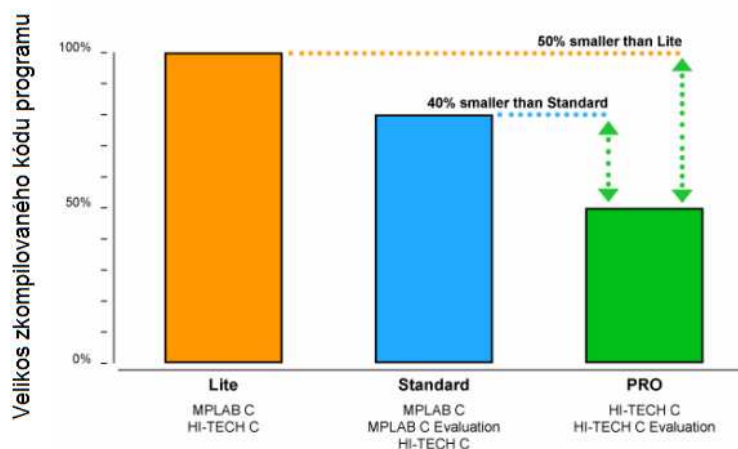
Obr. 4.18: Ukázka části programového kódu pro navázání spojení se stanicí prostřednictvím virtuálního COM portu vytvořeného za pomoci USB převodníku FT232.

5. Realizace hardware stanice pro testování senzorů plynů

Pro návrh DPS byl použit známý program Eagle 5.7 od firmy CadSoft, Německo. Zdrojový kód pro MCU byl psán v jazyce ANSI C v prostředí Maple IDE od firmy Microchip, USA, ukázka viz obr. 5.1. Pro kompilaci zdrojových kódů pro MCU v jazyce C byl použit kompilátor HI-TECH od stejné firmy. Jedná se o kompilátor s nejlepší optimalizací výsledného kódu pro MCU PIC psaného v jazyce C [24]. Tuto skutečnost ukazuje i porovnání v graf na obr. 5.2.



Obr. 5.1: Pohled na vnitřní uspořádání přístroje



Obr. 5.2: Porovnání velikosti výsledného programového kódu pro MCU s použitím různých verzí kompilátorů od firmy Microchip [24].

Pro přenos zkompilevaného kódu do MCU PIC byl použit ověřený programátor Presto od firmy Asix s.r.o., Česko (Obr. 5.3) za pomoci rozhraní ICSP.

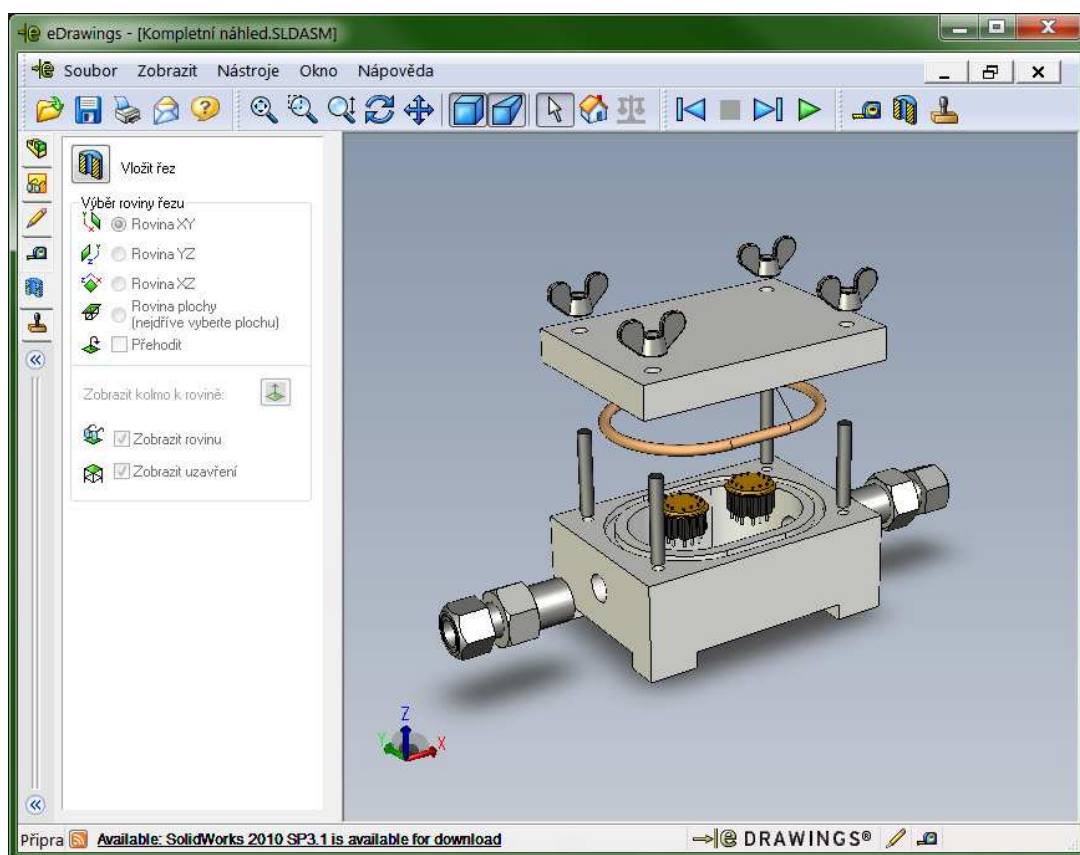


Obr. 5.3: Programátor MCU Presto od firmy Asix s.r.o..

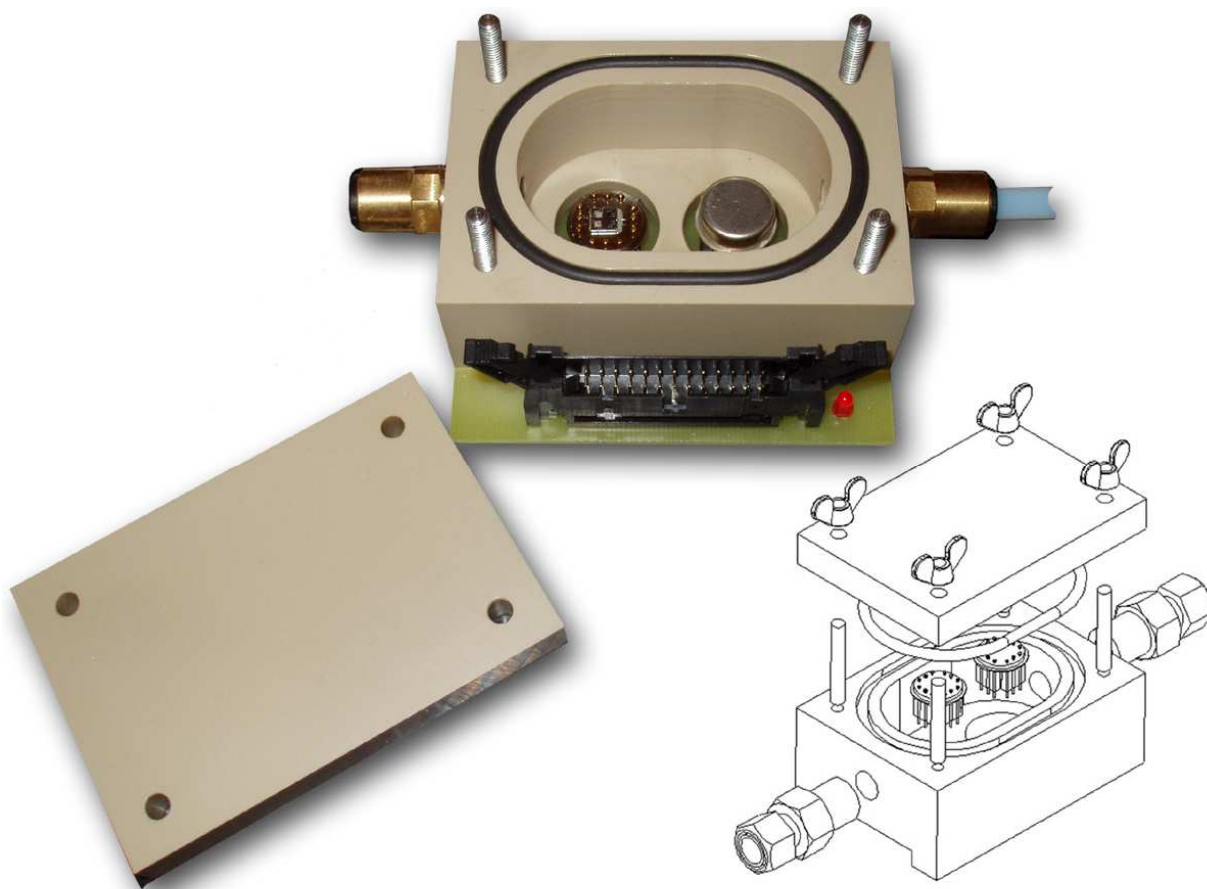
5.1. Konstrukce systému pro míchání plyné směsi

Pro řízení průtoku plynu kromě vybraných regulátorů průtoku byli použity tři 24 V solenoidové ventily R2807. Tyto ventily umožňují okamžité zastavení, nebo puštění průtoku plynu.

Na komůrku do které se budou uzavírat senzory, a ve které bude vytvářena přesně definovaná atmosféra pro měření, jsou kladeny následující požadavky: vzduchotěsnost, materiál odolný vůči vysoké teplotě senzorů, stálost chemických vlastností, chemická netečnost. Nezbytný je také snadný přístup pro výměnu senzorů. Návrh komůrky byl proveden v programu SolidWorks od firmy Systém Solid Works Corp., USA. Výsledek návrhu v programu je vidět na obr. 5.4. Pro výrobu komůrky byl vybrán plastový materiál pod obchodním názvem Ketron od firmy Tribon, ČR. Tento materiál vykazuje odolnost vůči teplotám kolem 300 °C, krátkodobě až 500 °C. Má vhodné chemické vlastnosti, je pevný, ale zároveň vhodný pro opracování pomocí frézování. Výslednou podobu vyrobené komůrky lze vidět na obr. 5.5. Objem komůrky je 34 ml. Podklady pro její výrobu jsou uvedeny v příloze.



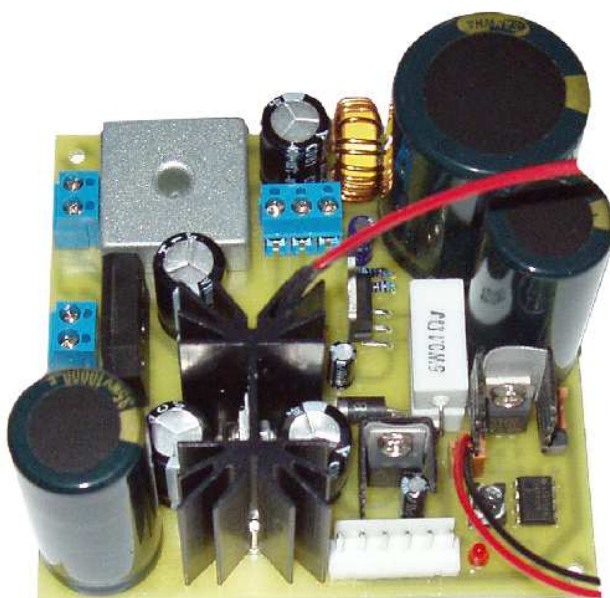
Obr. 5.4: Návrh plynové komůrky v programu SolidWorks.



Obr. 5.5: Výsledná podoba vyrobené plynové komůrky.

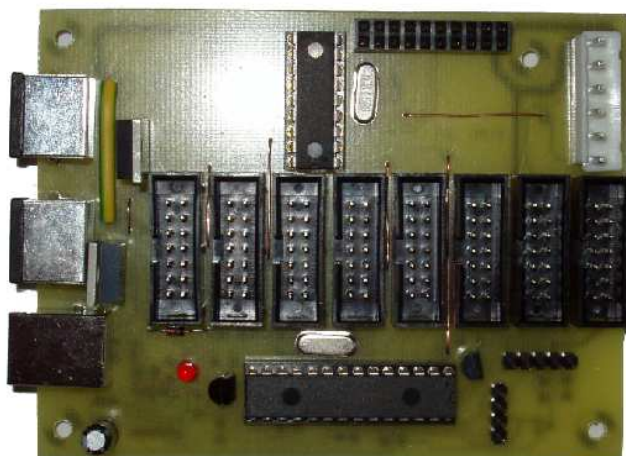
5.2. Konstrukce napájecího zdroje zařízení

V přílohách lze nalézt obvodové řešení napájecího zdroje. Pro výkonový zdroj +18 V byl použit integrovaný stabilizátor L200 vycházející ze známé řady stabilizátorů 723, který umožňuje snadnou implementaci proudové ochrany zdroje. Dále zajišťuje dostatečné potlačení vstupního kolísání napětí, které se tak nepřenáší na výstup. Pro velký odběr a malé zvlnění na vstupu stabilizátoru byla vypočtena dostatečně velká filtrační kapacita. Napětí -18 V je získáno z napěťové násobičky a usměrněného pomocí třívstupý stabilizátoru LM7918. Podobný stabilizátor řady 7805 byl použit i pro napětí +5 V, které má vlastní okruh. Na vstupu transformátoru byli připojeny další filtrační prvky jako variátor, filtrační kapacita a další. Celý zdroj je pro svůj výkonový charakter vybaven ventilátorem, který se spouští automaticky při překročení teploty chladiče nad 60 °C. Osazená deska plošného spoje napájecího zdroje je na obr. 5.6.

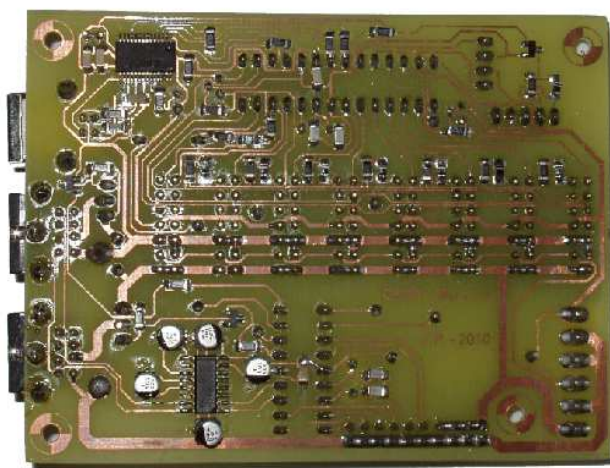


Obr. 5.6: Finální osazená DPS pro zdroj napájení.

5.3. Konstrukce centrální komunikační jednotky



Obr. 5.7: Finální osazená DPS pro centrální komunikační jednotku.

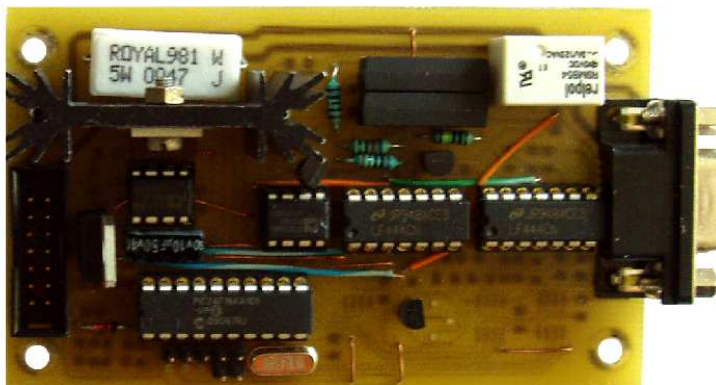


Obr. 5.8: Pohled na osazenou spodní stranu centrální komunikační jednotky.

5.4. Konstrukce měřicího kanálu

Pro přepínání jednotlivých proudových zdrojů bylo použito miniaturních relátek. Byla zkoumána i možnost využití analogových prepínačů pro jejich větší rychlost a delší životnost, ale ty se ukázali pro svůj velký odpor v sepnutém stavu, teplotní závislost a malé spínané proudy jako nevhodné. Pro říditelný zdroj byl místo diferenčního zesilovače použit integrovaný přístrojový zesilovač AD620, který má menší offset a větší přesnost zesílení než kdyby byl konstruován jako diskretní. Důležitá byla volba operačních zesilovačů s co největší vstupní impedancí pro malé vstupní proudy. V úvahu připadají pouze operační zesilovače s MOS tranzistory na vstupu. Jako nejvhodnější byl vybrán OZ LD444CN od firmy Motorola, USA. Jeho vstupní odpor dosahuje hodnot $10^{12} \Omega$, což je téměř maximum co lze v katalozích firem najít. Výhodou je i příznivá cena. Byli také testovány Chopperované OZ řady ICL7650SCCPA, které podle katalogových hodnot mají vstupní klidové proudy v řádech pA a napěťový offset v řádech μV , ale jejich praktická zkouška prokázala horší vlastnosti měřicího obvodu. Jako snímací odpory pro proudové zdroje byli použity odpory s malou teplotní závislostí a maximální možnou přesností. Požadavky na přesnost nebylo možno splnit

pouze u výkonového odporu pro proudový zdroj s největším proudem, jelikož byl vybrán drátový rezistor s 5 % tolerancí. Nic lepšího a cenově dostupného v katalozích nalezeno nebylo.



Obr. 5.9: Finální podoba osazené DPS modulu měřicího kanálu.

5.5. Finální uspořádání měřicí stanice

Celé zařízení bylo umístěno do plastové krabice a jeho podoba je na následujících obrázcích.



Obr. 5.10: Pohled na přední panel měřicího přístroje.



Obr. 5.11: Pohled na zadní panel měřicího přístroje.



Obr. 5.12: Pohled na vnitřní uspořádání přístroje

Pohled na reálné uspořádání systému plynového hospodářství je na obr. 5.13.

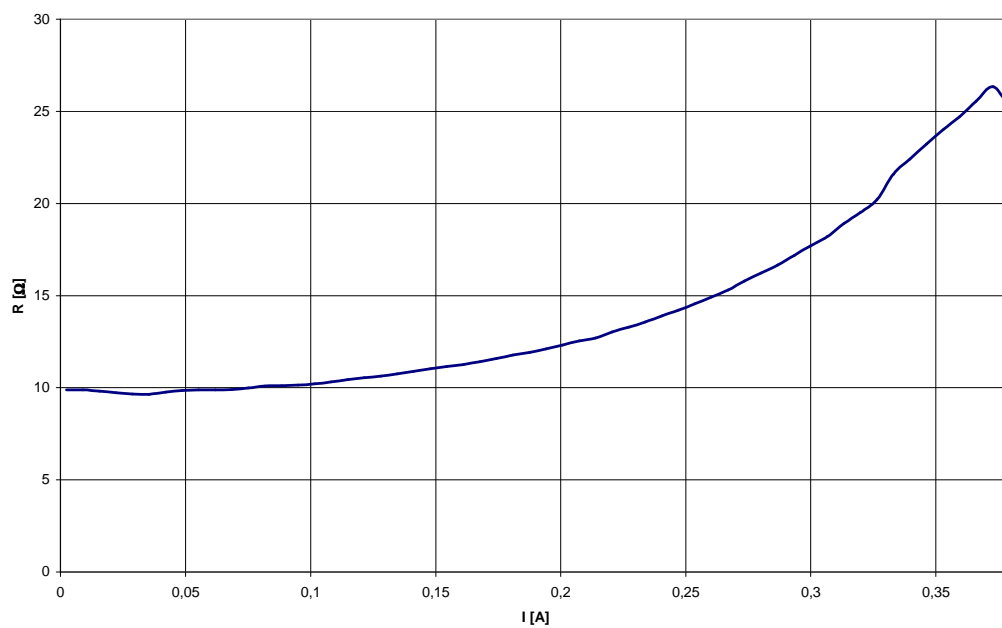


Obr. 5.13: Pohled na reálné uspořádání systému plynového hospodářství.

6. Ověření funkčnosti stanice a souhrn hlavních výsledků práce

6.1. Ověření funkčnosti pro TLV a TNV topný element

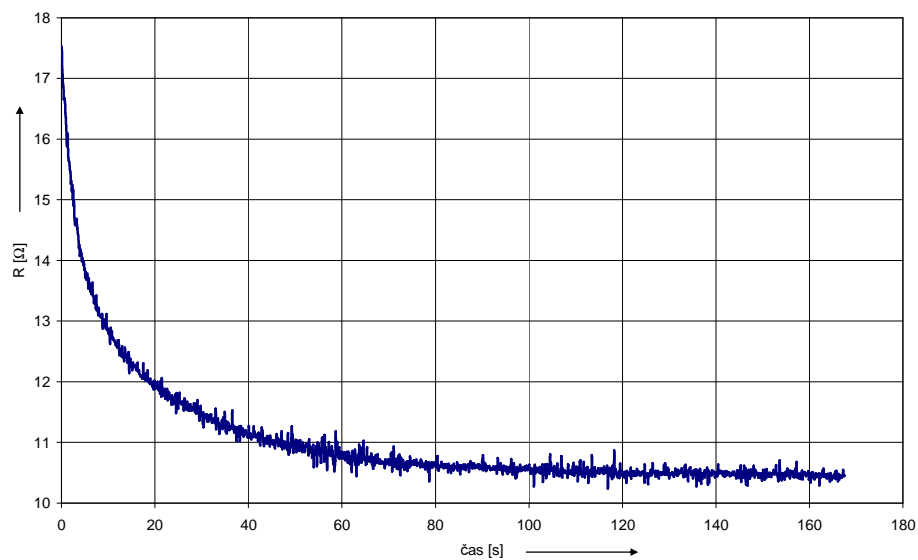
Na obr. 6.1 je proměřena závislost odporu vyhřívacího elementu. Po každém nastavení proudu byl senzor 5 min temperován.



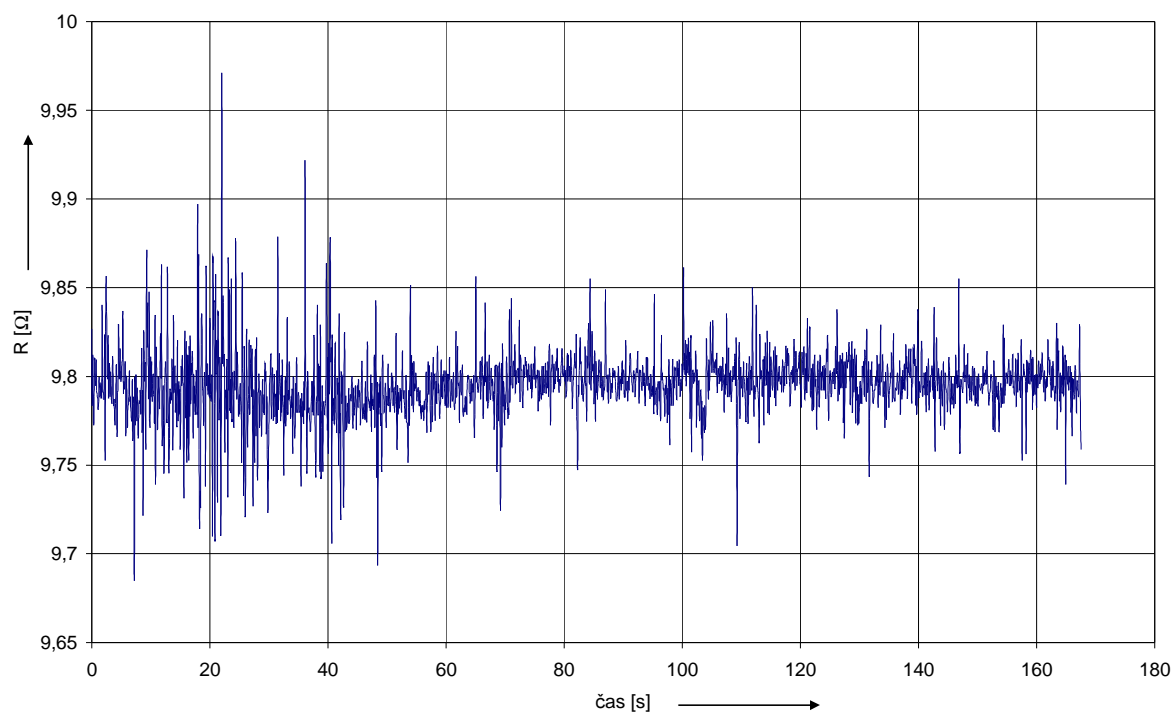
Obr. 6.1: Změřená závislost odporu topného elementu TLV senzoru pro různé proudy.



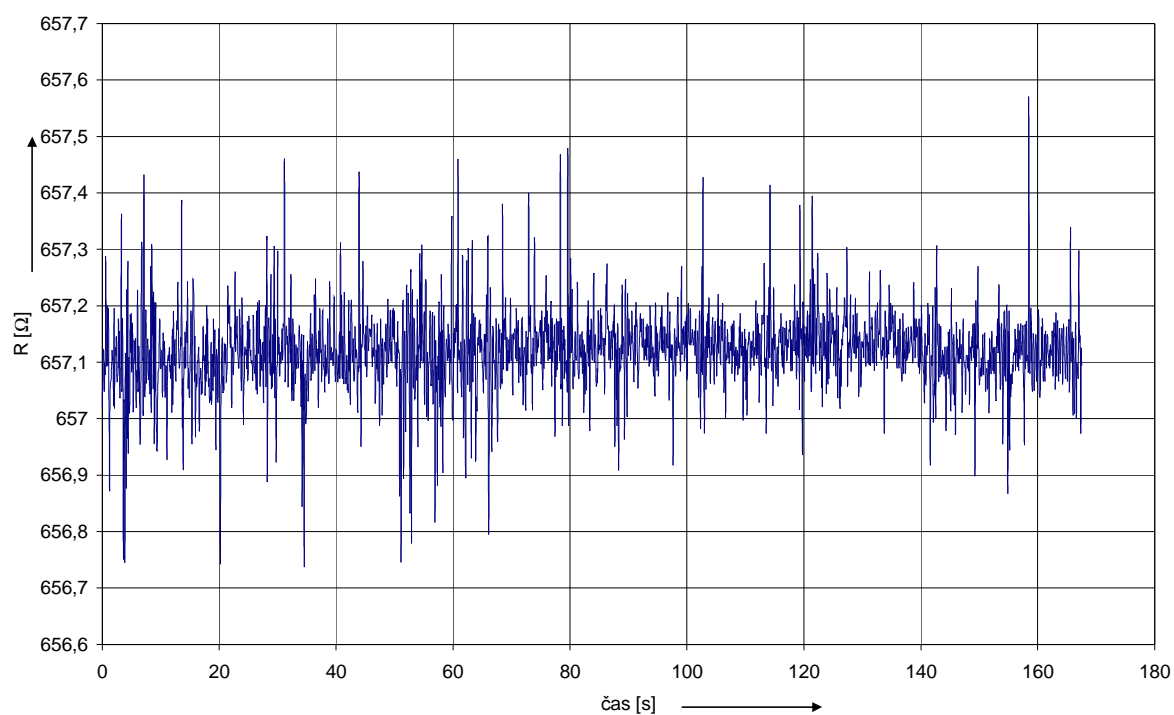
Obr. 6.2: Ukázka topného elementu TLV senzoru při vysoké teplotě.



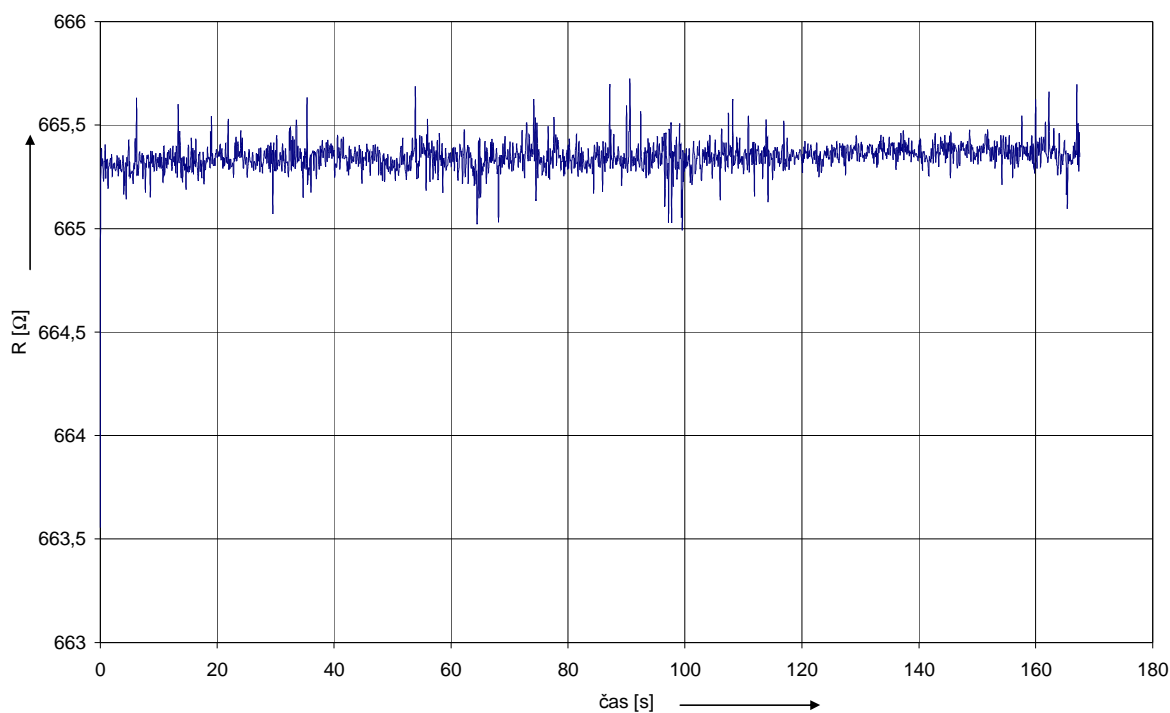
Obr. 6.3: Změřená závislost odporu topného elementu TLV senzoru při poklesu vyhřívacího proud z 250 mA na 1 mA.



Obr. 6.4: Ukázka naměřené hodnoty odporu topného elementu TLV senzoru při konstantním proudu 5 mA.



Obr. 6.5: Ukázka naměřené hodnoty odporu topného elementu TNV senzoru při konstantním proudu 0,5 mA.



Obr. 6.6: Ukázka naměřené hodnoty odporu topného elementu TNV senzoru z obr. 6.5 bezprostředně po skoku z 0,5 mA na 3 mA.

6.2. Ověření měření rezistivity aktivní vrstvy senzoru

Byli měřeny různé velikosti odporů v celém rozsahu měřicí stanice a naměřená hodnota byla porovnávána s výsledky z různých komerčních měřidel s dostatečnou přesností měření. Rozdíl takto naměřených hodnot nepřesáhl ani v nejhorších případech 1 %.

7. Závěr

Předkládaná práce je zaměřena na problematiku senzorů plynů, jejich konstrukci a testování. Hlavním cílem bylo navrhnout a zkonstruovat přístroj pro jednoduché testování vodivostních senzorů plynů jak v tlustovrstvém tak v tenkovrstvém provedení umístěných v pouzdře TO-12.

Celé zařízení je koncipováno jako modulární, aby bylo možné jednotlivé moduly snadno upravovat a nahrazovat za jiné. Zařízení se skládá ze systému plynového hospodářství, který má za úkol přípravu plyné směsi pro měření. Další součástí je centrální komunikační jednotka, která zajišťuje komunikaci mezi jednotlivými moduly a uživatelem. Toto rozhraní umožňuje připojit až osm na sobě nezávislých měřicích kanálů a měřit tak až osm senzorů současně. Celá testovací stanice je ovládána jako virtuální měřicí přístroj z PC pomocí softwarového prostředí LabView od fy National Instruments, USA. Tento software navíc v případě potřeby umožňuje snadnou a rychlou modifikaci měřicího programu.

Pro míchání plyné směsi se jako nejvhodnější ukázalo použití sestavy dvou digitálních regulátorů průtoku plynů. Dalším krokem byl návrh měřicího zařízení, které musí umožňovat přesné nastavení pracovní teploty senzoru a měření změny vodivosti (rezistivity) senzoru, jako reakci na přivedenou směs plynů. První část týkající se nastavování pracovní teploty senzoru s přesností $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ je řešena za pomoci říditelného proudového zdroje a DSP (PID regulace v digitální podobě). Pro měření vodivosti aktivní vrstvy senzoru byl navržen přepínatelný zdroj proudu se třemi rozsahy (100 nA, 10 μA , 1 mA), který umožňuje měření rezistivity aktivní vrstvy v rozsahu od 10 Ω do 100 M Ω s dostatečným odstupem signál-šum. Po vyřešení těchto dílčích úkolů byl zkonstruován funkční vzor měřicí stanice a byly otestovány její měřicí schopnosti. Dále mělo být provedeno měření s tenkovrstvními senzory plynů, ale ukázalo se, že jsou senzory nefunkční. Další TLV senzory s SnO₂ aktivní vrstvou a Pt topným elementem jsou již přichystány, ale s časovými důvody již není možné měření opakovat a výsledky začlenit do řešení této práce. Další testování stanice bude pokračovat v co nejbližší době, jelikož může být velkým přínosem pro Laboratoř elektrochemických senzorů a nanotechnologií na Ústavu mikroelektroniky VUT v Brně.

8. Seznam použitých zdrojů

- [1] Husák M., *Mikrosenzory a mikroaktuátory*, ACADEMIA Praha, 2008, 535 s., ISBN 978-80-200-1478-8.
- [2] Harvey, D., *Modern Analytical Chemistry*, USA: The McGraw-Hill Companies, Inc., 2000, 798 s. ISBN 0-07-237547-7
- [3] IVANOV, Peter Tsolov. *Design, Fabrication and Characterization od Thick-Film Gas Sensors*. Spain, 2004. 251 s. Dizertační práce. Universitat Rovira i Virgili. Vedoucí práce Xavier Correig Blanchar.
- [4] Alexander Vergara Tinoco, *Improving The Performance Of Micro-Machined Metal Oxide Gas Sensors: Optimization Of The Temperature Modulation Mode Via Pseudorandom Sequences*, PhD Thesis, Spain, Universitat Rovira I Virgili., 2006, 240 s., ISN: 978-84-690-7603-3, DL: T.1219-2007
- [5] Vrnáta M., Vysloužil F., *Chemické vodivostní senzory*, Elektronické výukové texty [online], 2008 [cit. 2010-04-04]. Dostupné z WWW: <<http://www.vscht.cz/ufmt/cs/pomucky/vrnatam/>>.
- [6] Hubálek, J., Aámek, M. *Mikrosenzory a mikroelektromechanické systémy*, Brno: VUT, 2004
- [7] *2000 Common Info* [online]. 25.4.2004 [cit. 2010-03-20]. The Leader in Semiconductor Gas Sensor Technology. Dostupné z WWW: <<http://www.figarosensor.com/>>
- [8] Vydra, F., Štulík, K. Juláková E. *Rozpouštěcí polarografie a voltametrie*, Praha: SNLT – Nakladatelství technické literatury, 1977, 256 s.
- [9] Blackwood D., Josowicz M.: *Work function and spectroscopic studie sof interactions between conducting polymers and organic vzpoura*. J. Phzs Chem., 95, 1991, s. 493-502.
- [10] *Mass Flow Meters and Controllers*, Alicat Scientific Mass Flow Instruments [online]. 2008 [cit. 2010-04-15]. Dostupné z WWW: <<http://www.alicatscientific.com>>
- [11] *Series Mass and Volumetric Precision Gas Flow Controller - Operating Manual* [online], 2009 [cit. 2010-03-10]. Dostupné z WWW: <<http://ams.cern.ch/>>
- [12] Future Tecnology Device International Ltd. *FT232R datasheet*. [online]. 2009 [cit. 2010-04-15]. Dostupné z WWW: <[http:// www.ftdichip.com](http://www.ftdichip.com)>.
- [13] Krejčířík, A. *Lineární napájecí zdroje*. BEN – technická literatura, Praha 2001. 144 s. ISBN 80-7300-002-4.
- [14] Krejčířík, A. *Napájecí zdroje 1*. BEN – technická literatura, Praha 2002. 352 s. ISBN 80-86056-02-3.
- [15] *Měření teploty - kovové odporové senzory teploty* [online]. 20.5.2004 [cit. 2010-03-27]. Měření teploty - kovové odporové senzory teploty. Dostupné z WWW: <<http://hw.cz/Teorie-a-praxe/Dokumentace/ART1095-Mereni-teploty---kovove-odporove-senzory-teploty.html>>.

- [16] *Měření teploty - polovodičové odporové senzory teploty* [online]. 19.8.2004 [cit. 2010-02-22]. Měření teploty - polovodičové odporové senzory teploty. Dostupné z WWW: <<http://hw.cz/Teorie-a-praxe/Dokumentace/ART1141-Mereni-teploty---polovodicove-odporove-senzory-teploty.html>>.
- [17] Dostál, Jiří. *Operační zesilovače*. 1. inovované české vydání. BEN – technická literatura, Praha 2005. 536 s. ISBN 80-7300-049-0.
- [18] Blaha, P., Vařín, P. *Řízení a regulace I*. VUT Brno: 2005. s. 54-214.
- [19] Šolc, F.; Václavek, P.; Vařín, P. *Řízení a regulace II*. Brno: VUT, 2004. s. 1-230. ISBN: AMT07-004.
- [20] Pivoňka, P., *Číslicová řídicí technika*. VUT Brno: 2003.
- [21] SOTTER, Edgar, et al. *Thick film titania sensors for detecting traces of oxygen*. ScienceDirect. 2007, 5, s. 1-13.
- [22] National Instruments, *Začínáme s LabVIEW*, elektronický text , 2006, 373427A-01 <http://www.ni.com/>
- [23] Rick Bitter, Taqi Mohiuddin, Matt Naweocki, *LabView Advanced Programming Techniques Ebook*, elektronický text , 2001
- [24] *Microship Technology Inc.* [online]. 2009 [cit. 2010-05-6]. Microchip. Dostupné z WWW: <<http://www.microchip.com/>>.

9. Přílohy

Komunikace s centrální komunikační jednotkou: >0xxxxx;		
Příkaz*	Význam	Vrácená hodnota*
?	Zjištění stavu jednotky – vrací OK	OK
t	Zjištění teploty z čidla umístěného na DPS centrální kom. jednotky	xx.x – teplota ve °C
e	Přivedení signálu log. 1 na datový vodič EN pro měřicí kanály (lze využít např. pro spouštění MCU měřicího kanálu)	-
d	Přivedení signálu log. 0 na datový vodič EN pro měřicí kanály (lze využít např. pro vypnutí MCU měřicího kanálu)	-

* posíláno v ASCII kódu

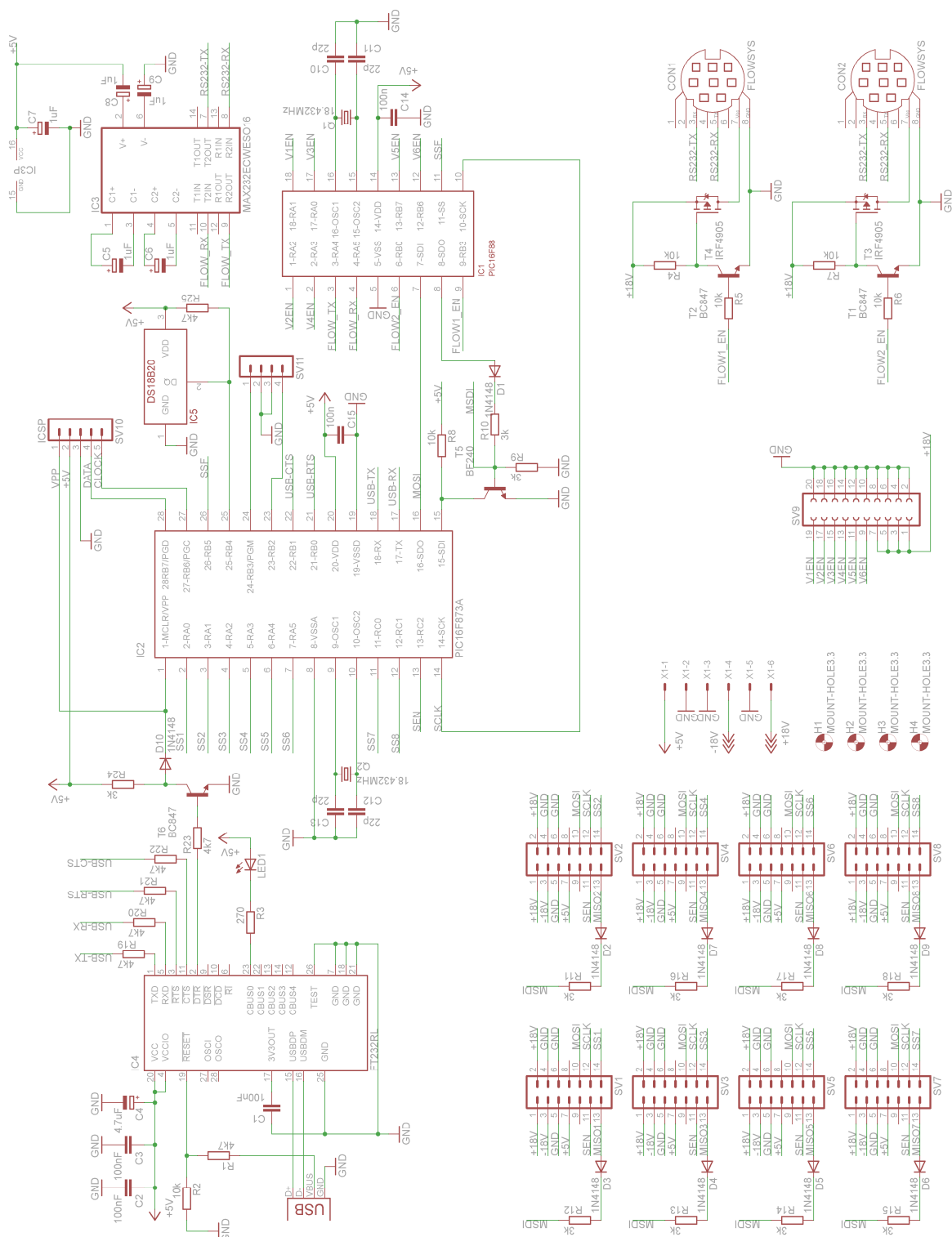
Komunikace se systémem pro míchání plynné směsi: >9xxxxx;		
Příkaz*	Význam	Očekávaná odezva*
?	Zjištění stavu modulu pro míchání	OK
1 až 8	Negace stavu zapnutí pro jednotlivé ventily a regulátory průtoku plynů (1-6 ventily, 7-8 regulátory průtoku plynů)	xxxxxxxx – aktuální stav všech ventilů a regulátorů, 1 – ON, 0 – OFF
s	Kontrola stavu zapnutí jednotlivých ventilů a regulátorů	xxxxxxxx – aktuální stav všech ventilů a regulátorů, 1 – ON, 0 – OFF
a:xxxx nebo b:xxxx	Příkaz pro A nebo B regulátor průtoku plynu viz podkapitola 4.2 nebo viz [11]	ASCII odpověď regulátoru
a? nebo b?	Zjištění aktuálního stavu regulátor průtoku plynu	Odpověď ve formátu viz podkapitola 4.2 nebo viz [11]

* posíláno v ASCII kódu

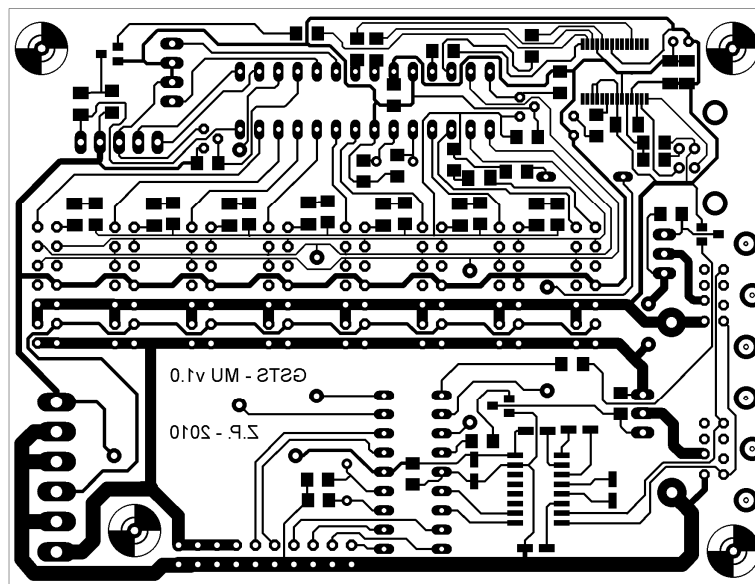
Komunikace se systémem pro míchání plynné směsi: >1xxxxx; až >8xxxxx;		
Příkaz*	Význam	Očekávaná odezva*
?	Zjištění stavu modulu pro měření	OK
IH0000 až IH4095	Nastavení proudu heatrem	-
IHL/IHH	IHL – volba rozsahu proudu heatrem 0 až 10 mA IHH – volba rozsahu proudu heatrem 0 až 1 A	-
UH/US	UH – měření napětí na heatru US – měření napětí na senzoru	xxxxxx – hodnota napětí odečtená ADC, nutno přepočítat viz návrh měřicího kanálu
IS1 až IS3	IS1 – proud senzorem 100 nA IS2 – proud senzorem 10 µA IS3 – proud senzorem 1 mA	-
RPxxx/RIxxx/RDxxx	Nastavení konstant pro PID regulátor teploty heatru	-
Hyxxxxxxxx	Automatické nastavení požadovaného odporu heatru (nastavení teploty senzorem) : (Pro y platí : 0 – negativní teplotní součinitel odporu, 1 – pozitivní teplotní součinitel odporu) xxxxxx je odpor heatru v mΩ	-
AC1 až AC9	Autokalibrace měřicího kanálu	-

* posíláno v ASCII kódu

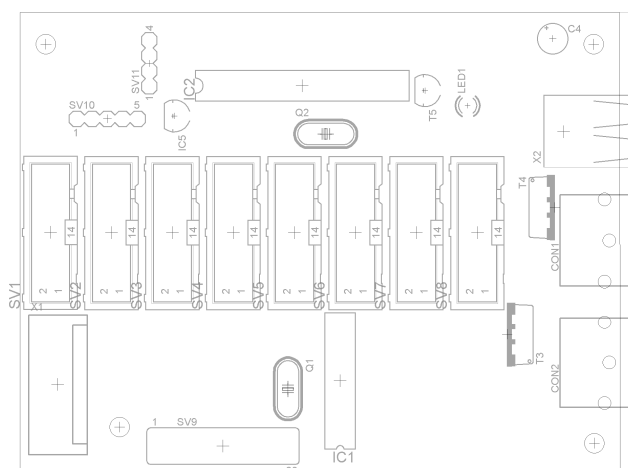
Příloha 1: Přehled základních příkazů pro komunikaci s jednotlivými subsystémy testovací stanice



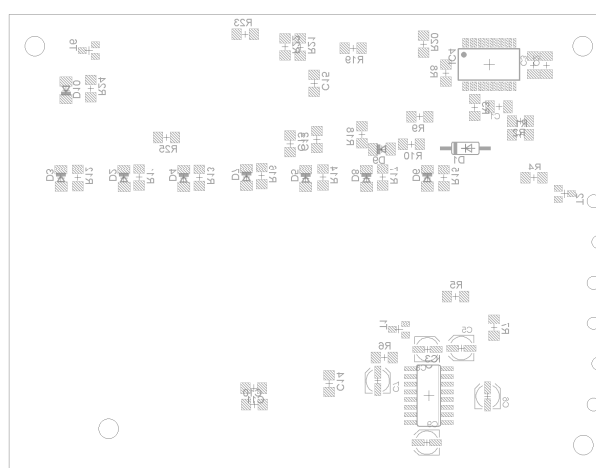
Příloha 2: Schéma zapojení centrální komunikační jednotky část 1/2



Příloha 3: DPS pro centrální komunikační jednotku - část 1/2 1:1 (75 mm x 100 mm)



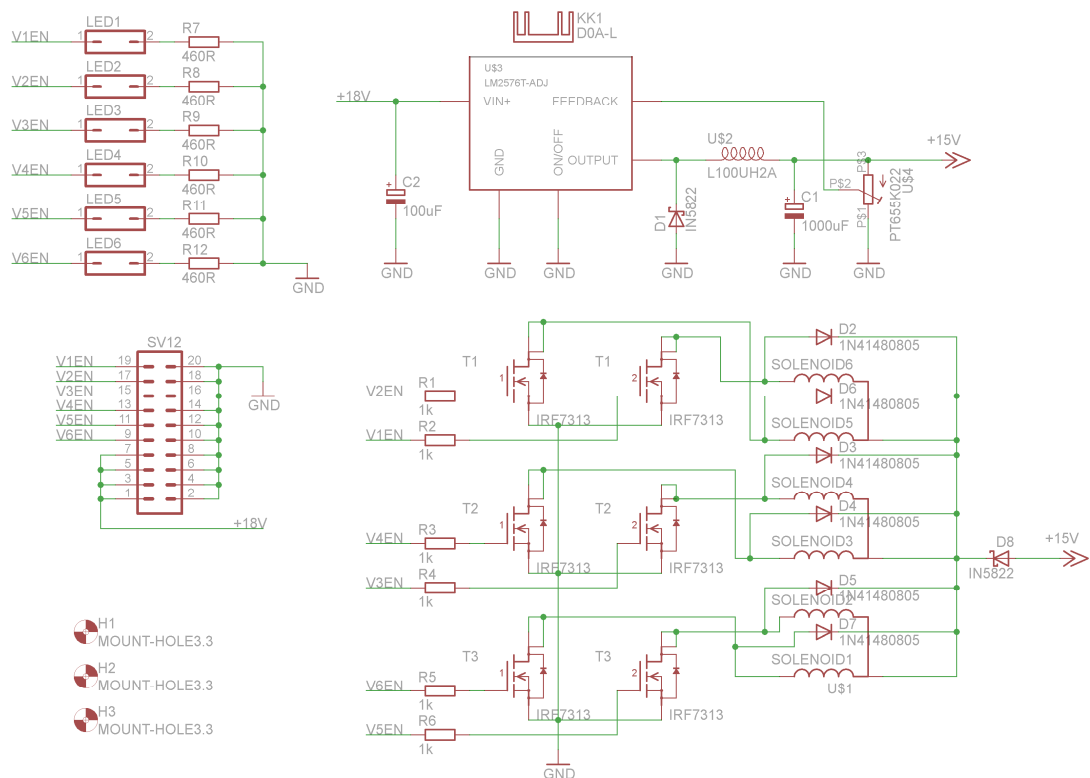
Příloha 4: Osazovací plán THD součástek pro centrální komunikační jednotu - část 1/2



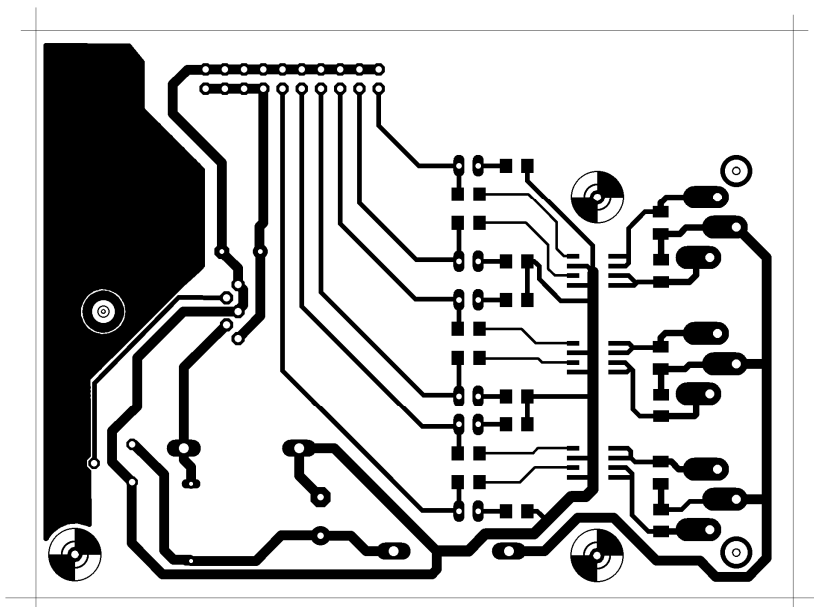
Příloha 5: Osazovací plán SMD součástek pro centrální komunikační jednotu - část 1/2

Part	Value
C1, C2, C3	100nF
C4	4.7uF
C5, C6, C7, C8, C9	1uF
C10, C11, C12, C13	22p
C14, C15	100n
CON1, CON2	FLOWSYS
D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7, D8, D9, D10	1N4148
IC1, IC2	PIC16F88
IC3	MAX232ECWE
IC4	FT232RL
IC5	DS18B20
Q1, Q2	18.432MHz
R3	270
R2, R4, R5, R6, R7, R8, R24	10k
R9, R10, R11, R12, R13, R14, R15, R16, R17, R18	3k
R1, R19, R20, R21, R22, R23, R25	4k7
SV10	ICSP
T1, T2, T6	BC847
T3, T4	IRF4905
T5	BF240
X2	USB-B-H

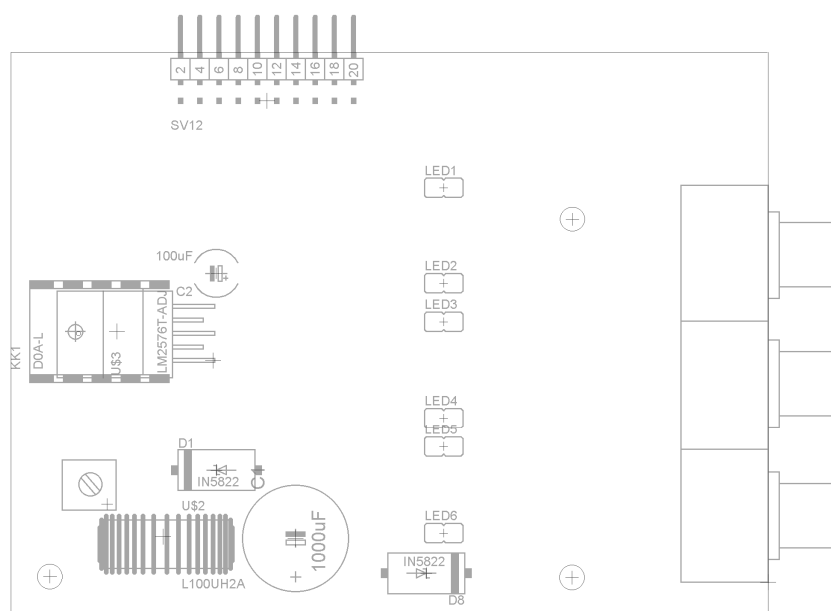
Příloha 6: Seznam součástek použitých pro centrální komunikační jednotku – část 1/2



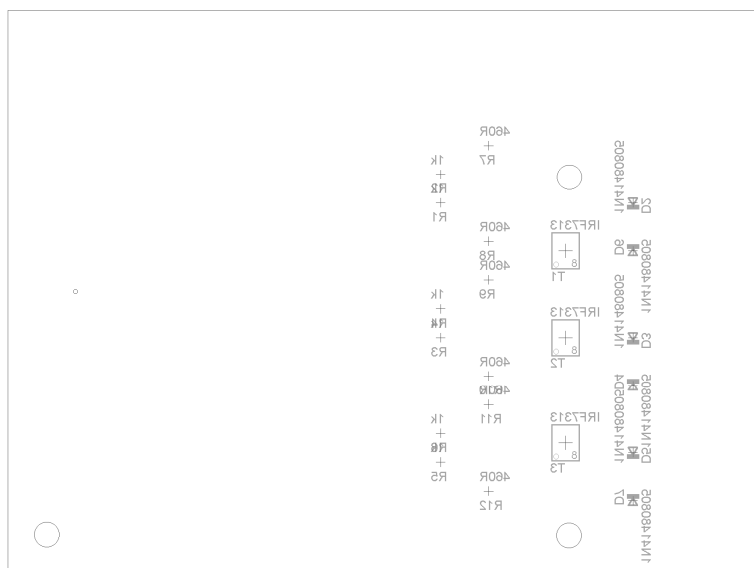
Příloha 7: Schéma zapojení centrální komunikační jednotky část 2/2



Příloha 8: DPS pro centrální komunikační jednotku - část 2/2 1:1 (75 mm x 100 mm)



Příloha 9: Osazovací plán THD součástek pro centrální komunikační jednotku - část 2/2

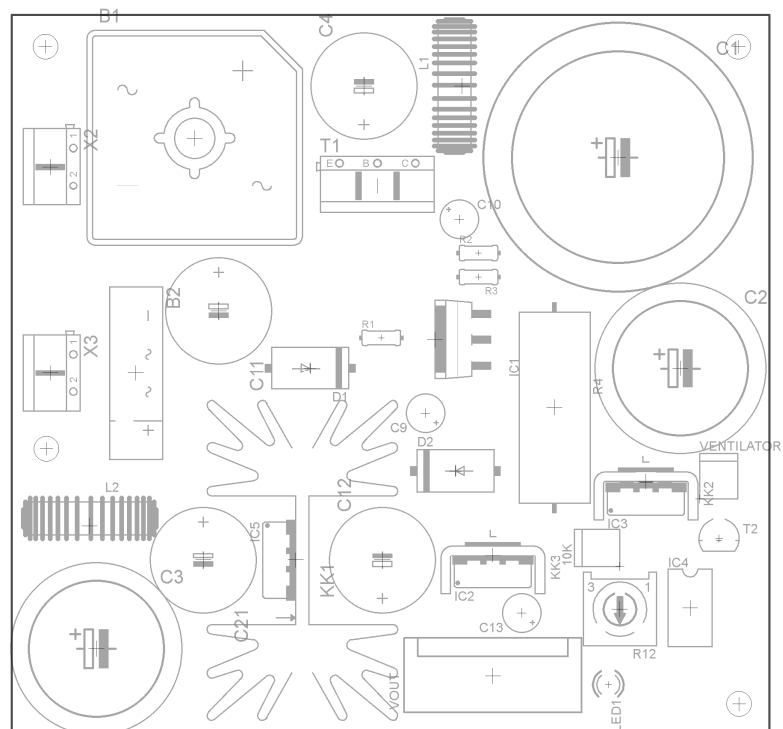


Příloha 10: Osazovací plán SMD součástek pro centrální komunikační jednotu - část 2/2

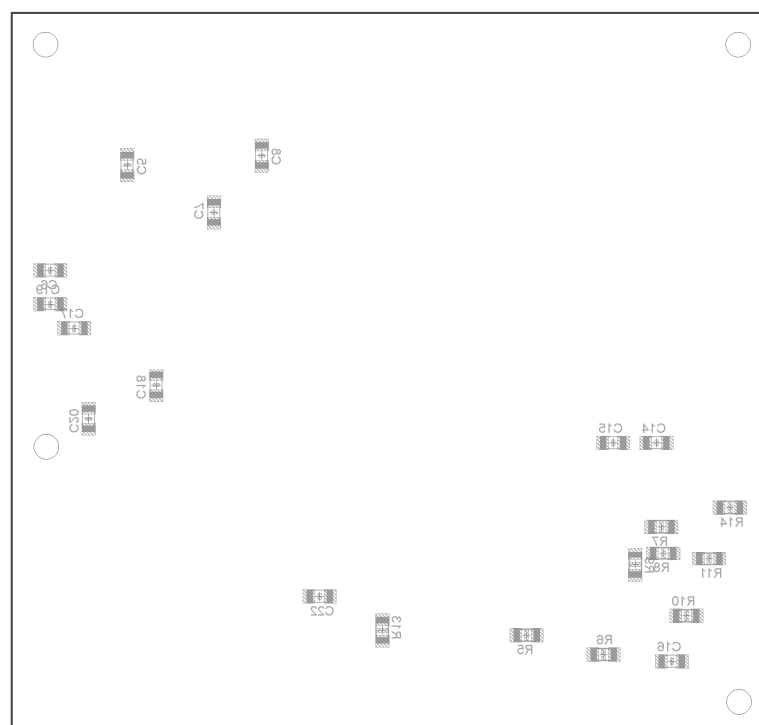
Part	Value
C1	1000uF
C2	100uF
D1	IN5822
D2, D3, D4, D5, D6, D7	1N41480805
D8	IN5822
R1, R2, R3, R4, R5, R6	1k
R7, R8, R9, R10, R11, R12	460R
T1, T2, T3	IRF7313
U1	CINCH6-SOL
U2	L100UH2A
U3	LM2576T-AD
U4	PT655K022

Příloha 11: Seznam součástek použitých pro centrální komunikační jednotku – část 2/2

Příloha 13: DPS pro napájecí zdroj 1:1 (95 mm x 95 mm)



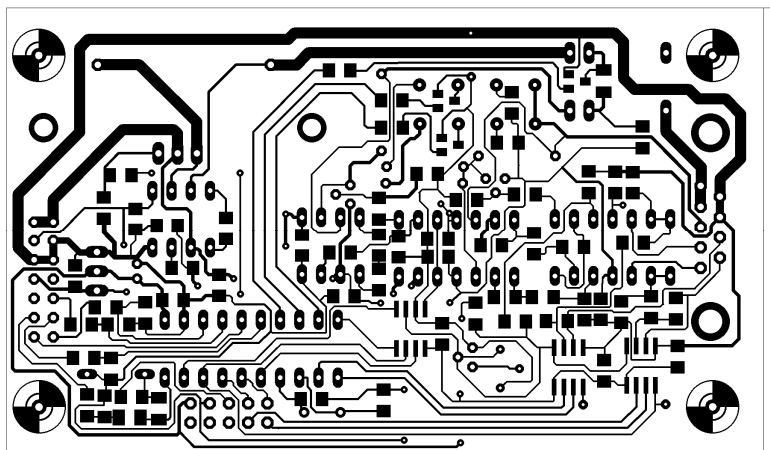
Příloha 14: Osazovací plán THD součástek pro napájecí zdroj



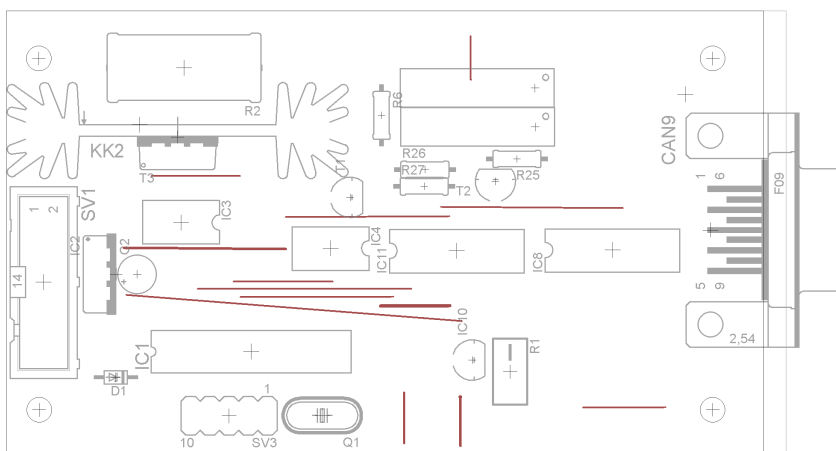
Příloha 15: Osazovací plán SMD součástek pro napájecí zdroj

Part	Value
10K	NTC1
B1	KBPC35005W
B2	RS602
C1	22000uF/35V
C2, C3	10000uF/35V
C4, C11, C12, C21	1000uF/35V
C5, C6, C7, C8, C14, C16, C17, C18, C19, C20, C22	100n
C9	10uF
C10	0.1uF
C13	1uF
C15	330n
D1, D2	1N5822
IC1	L200
IC2	7918CT
IC3	7812
IC4	UA741
IC5	L7805ACV
KK1	HS-142-38
L1	200uH
L2	64uH
I.01	RED
R1	56R
R2	330
R3	1k8
R4	0.75R/10W
R5, R7	10k
R6	2k5
R8	20k
R9, R14	1k5
R10	100k
R11, R13	5k
R12	22k
T1	MJ11015+PR13
T2	BC337
VENTILAT	OR VENTILATOR
X2	20V AC
X3	9V AC

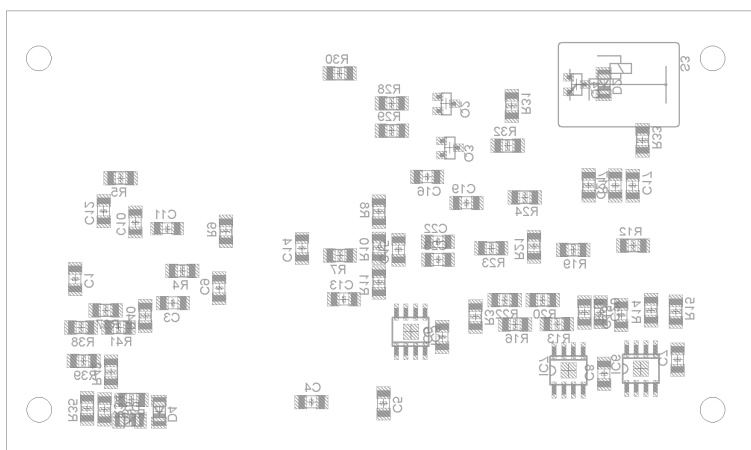
Příloha 16: Seznam součástek použitých pro napájecí zdroj



Příloha 18: DPS pro měřicí kanál 1:1 (60 mm x 100 mm)



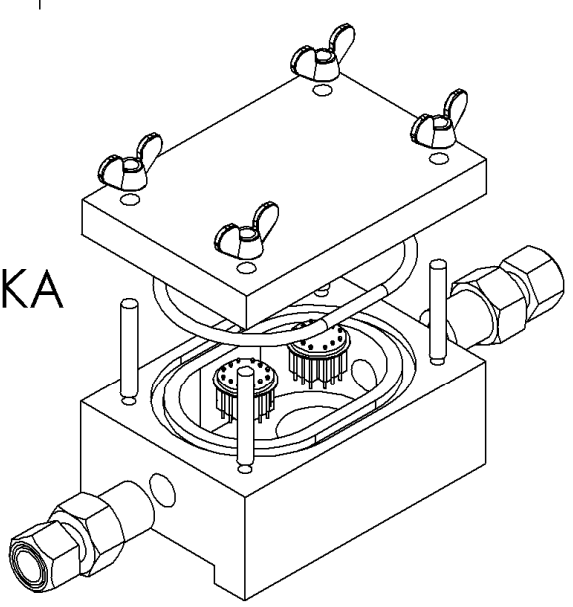
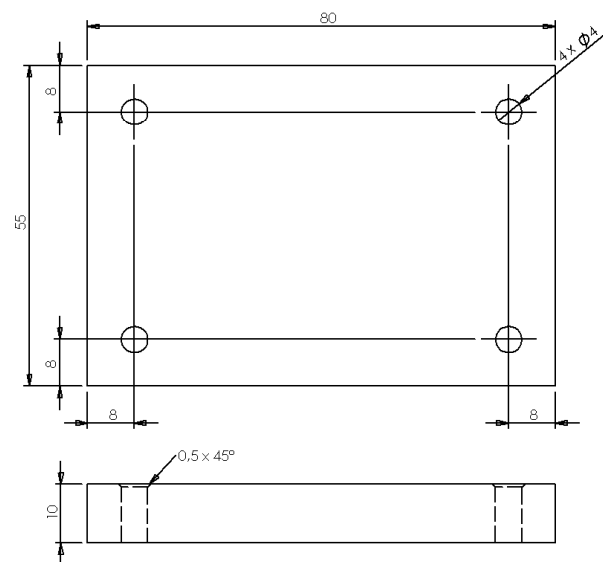
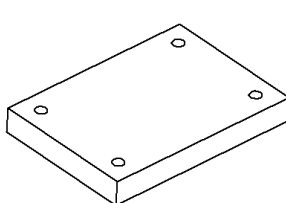
Příloha 19: Osazovací plán THD součástek pro měřicí kanál



Příloha 20: Osazovací plán SMD součástek pro měřicí kanál

Part	Value
C1, C3, C6, C7, C8, C9, C10, C13, C14, C20, C21, C22, C23	100nF
C2	10uF
C4, C5	22pF
C11, C15, C17, C18, C19	15pF
C12, C16	33nF
D1	ZF9,1/BZC5
D2, D3, D4	1N41480805
IC1	PIC24F16KA
IC2	LD1117V33
IC3, IC4	AD620N
IC5	MCP4921
IC6, IC7	MCP3551
IC8, IC11	LF444CN
IC10	LT1009CLP/
KK2	SK104-PAD
Q1	18.432M
Q2, Q3, Q4	BSS123
R1, R9, R18, R19, R20, R21, R22, R23, R24, R26	10k
R2	0R47/5W
R3	3k6
R4, R5, R7, R8	1k
R6, R27	100
R10, R12, R14	30k
R11	3k
R13, R15	4k7(5k1)
R16	4k49
R17	100R
R25	1M
R28, R29, R30	4k7
R31, R32	1k6
R33	220R
R35,R37, R38, R39	1k2
R36	10
R34, R40, R41, R42	2k2
S1, S2	S1A050D00
S3	RSM954
SV3	ICSP
T1, T2	BC547
T3	BU806

Příloha 21: Seznam součástek použitých pro měřicí kanál

	1	2	3	4																																																																																																							
A	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div> <h1>PLYNOVÁ KOMŮRKA</h1> <h2>2008</h2> </div>  </div>																																																																																																										
R																																																																																																											
C																																																																																																											
D	  <p style="text-align: center;">(1:2)</p>																																																																																																										
E	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td colspan="2" style="font-size: 0.8em;">UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:</td> <td colspan="2" style="font-size: 0.8em;">FINISH:</td> <td colspan="2" style="font-size: 0.8em;">DEBUR AND BREAK SHARP EDGES</td> <td colspan="2" style="font-size: 0.8em;">DO NOT SCALE DRAWING</td> <td colspan="2" style="font-size: 0.8em;">REVISION</td> </tr> <tr> <td colspan="2"></td> <td colspan="2"></td> <td colspan="2"></td> <td colspan="4" rowspan="5" style="text-align: center; vertical-align: middle;"> <div style="font-size: 1.5em; font-weight: bold;">PLYNOVÁ KOMŮRKA VÍKO</div> </td> </tr> <tr> <td colspan="2">NAME</td> <td colspan="2">SIGNATURE</td> <td colspan="2">DATE</td> </tr> <tr> <td colspan="2">DRAWN Bc. Zdeněk Pytlíček</td> <td colspan="2"></td> <td colspan="2"></td> </tr> <tr> <td colspan="2">CHK'D Ing. Jan Prošek Ph.D.</td> <td colspan="2"></td> <td colspan="2"></td> </tr> <tr> <td colspan="2">APP'D</td> <td colspan="2"></td> <td colspan="2"></td> </tr> <tr> <td rowspan="4" style="font-size: 0.8em; vertical-align: middle;">F</td> <td colspan="2">MFG</td> <td colspan="2"></td> <td colspan="2"></td> <td colspan="4" rowspan="2" style="font-size: 0.8em;">DWG. NO.</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Q.A</td> <td colspan="2"></td> <td colspan="2"></td> </tr> <tr> <td colspan="2"></td> <td colspan="2"></td> <td colspan="2"></td> <td colspan="4" rowspan="2" style="font-size: 0.8em;">A4</td> </tr> <tr> <td colspan="2"></td> <td colspan="2"></td> <td colspan="2"></td> </tr> <tr> <td colspan="2"></td> <td colspan="2"></td> <td colspan="2" style="font-size: 0.8em;">MATERIAL: KETRON PEEK 1000</td> <td colspan="4" rowspan="2" style="font-size: 0.8em;">SCALE: 1:1</td> </tr> <tr> <td colspan="2"></td> <td colspan="2"></td> <td colspan="2" style="font-size: 0.8em;">WEIGHT:</td> </tr> <tr> <td colspan="2"></td> <td colspan="2"></td> <td colspan="2"></td> <td colspan="4" style="font-size: 0.8em;">SHEET 1 OF 2</td> </tr> </table>				UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION								<div style="font-size: 1.5em; font-weight: bold;">PLYNOVÁ KOMŮRKA VÍKO</div>				NAME		SIGNATURE		DATE		DRAWN Bc. Zdeněk Pytlíček						CHK'D Ing. Jan Prošek Ph.D.						APP'D						F	MFG						DWG. NO.				Q.A												A4														MATERIAL: KETRON PEEK 1000		SCALE: 1:1								WEIGHT:								SHEET 1 OF 2			
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION																																																																																																			
						<div style="font-size: 1.5em; font-weight: bold;">PLYNOVÁ KOMŮRKA VÍKO</div>																																																																																																					
NAME		SIGNATURE		DATE																																																																																																							
DRAWN Bc. Zdeněk Pytlíček																																																																																																											
CHK'D Ing. Jan Prošek Ph.D.																																																																																																											
APP'D																																																																																																											
F	MFG						DWG. NO.																																																																																																				
	Q.A																																																																																																										
							A4																																																																																																				
				MATERIAL: KETRON PEEK 1000		SCALE: 1:1																																																																																																					
				WEIGHT:																																																																																																							
						SHEET 1 OF 2																																																																																																					

Příloha 22: Výkres pro zadání výroby víka plynové komůrky

